

镜铁山高寒矿区排水渠改造工程防结冰措施分析及断面设计优化

申虎军

(甘肃镜铁山矿业有限公司, 甘肃 嘉峪关 735101)

摘要: 桦树沟排水渠是镜铁山矿区安全生产的关键工程, 渠道冬季结冰后会出现渠道结冰冻害, 严重威胁矿区曲轨平台及其他设施的安全运行, 并造成局部水生态问题。为防止甘肃镜铁山矿业有限公司桦树沟渠道水在下游入渗至矿体, 造成开采困难及安全隐患, 采用人工改造方式对桦树沟排水渠进行改造工程, 以保障矿区生产活动顺利和恢复局部水生态环境。改造结果表明, 在渠道设双层聚氨酯夹芯板进行保温, 并在进出口采用防寒门进行封闭的基础上, 将原宽浅式梯形渠优化为窄深式“U”形渠, 以增加小流量时的过流速度, 实现了渠道冬季无结冰过流运行。改造后排水工程实施后经过4个冬季的安全运行, 运行良好。由此可见, 防寒保温、增大流速的综合防冰冻改造措施可实现高寒地区小流量渠道的冬季不结冰安全运行, 这对寒冷地区冬季小流量排水工程设计及冬季安全运营起到一定的借鉴作用。

关键词: 镜铁山高寒矿区; 排水渠; 改造工程; 防结冰; 断面结构; 优化

中图分类号: TV672.3; TV698.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2024)09-0834-05

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2024.09.010

Analysis of Anti-freezing Measures and Cross-section Design Optimization for the Drainage Channel Reconstruction Project in the Cold Mining Area of Jingtie Mountain

SHEN Hujun

(Gansu Jingtie Mountain Mining Co., Ltd., Jiayuguan Gansu 735101, China)

Abstract: The Huashugou drainage channel is a key project for safe production in the Jingtie mountain mining area. Ice formation in the channel during winter leads to frost damage, posing serious threats to the safe operation of the track platforms and other facilities, as well as causing localized water ecological problems. To prevent water from the Huashugou channel from infiltrating the orebody downstream, which could complicate mining and introduce safety hazards, a reconstruction project was implemented using artificial methods. The aim was to ensure smooth production activities in the mining area and restore the local water ecological environment. The results of the reconstruction showed that by using double-layer polyurethane sandwich panels for insulation and installing cold-resistant doors at the inlet and outlet, the original wide and shallow trapezoidal channel was optimized into a narrow and deep “U”-shaped channel. This modification increased the flow velocity during low flow conditions, allowing for ice-free flow during winter. After four winters of operation, the drainage project ran safely and efficiently. This demonstrates that the comprehensive anti-freezing measures of insulation and increasing flow velocity can ensure ice-free and safe operation of low-flow channels in cold regions during winter, providing a reference for the design and safe operation of winter drainage projects in cold areas.

Key words: Cold mining area; Drainage channel; Reconstruction project; Anti-freezing; Cross-section structure; Optimization

镜铁山矿区位于祁连山区, 年平均气温 10.1 °C, 极端最高气温 38.4 °C, 极端最低气温 -29.8 °C, 年平均风速 2.2 m/s, 瞬时最大风速 25.7 m/s, 全年霜期最长 225 d, 历年最大积雪深度 16 cm, 最大冻土深度 177 cm。矿区桦树沟为北大河一级支沟,

流域面积 28.1 km², 是矿区较大的洪水沟道, 沟道下游通过桦树沟矿体。

镜铁山矿区桦树沟排水渠是镜铁山矿区安全生产的关键工程, 原桦树沟排水渠运行过程中, 由于渠道结冰, 堵塞渠道, 出现渠道结冰冻害,

收稿日期: 2023-11-25; 修订日期: 2024-05-22

作者简介: 申虎军(1976—), 男, 陕西米脂人, 助理工程师, 主要从事工程项目管理工作。Email: shenhujun@jiugang.com。

使渠道侧墙、底板及消力池产生严重破坏, 侧墙、底板开裂, 消力池下沉, 渠尾陡坡段塌陷冲毁, 渠道渗漏严重。冬季冰层堵塞及渗漏, 造成渠水外溢后, 涌入东侧矿区排渣道路流动、结冰, 导致排渣道路无法通行, 并威胁矿区曲轨平台及其他设施的安全运行, 渠道渗漏对渠基、排渣路路基造成影响, 并造成局部水生态问题。为防止桦树沟道水在下游入渗至矿体, 造成开采困难及安全隐患, 甘肃镜铁山矿业有限公司采用人工改道方式, 修建泄水洞及排水渠将桦树沟改道至北侧碎矿沟后排入北大河, 消除安全隐患, 恢复局部水生态环境, 保障矿区生产活动顺利进行及人员财产安全。

1 改造工程设计

1.1 设计目标

桦树沟排水渠改造工程设计, 是在分析原渠道结冰冻害问题的基础上, 采取相应的防冻胀、防结冰措施, 并优化渠道断面形式, 在保证汛期排洪的前提下, 实现极端寒冷(最大冻土深度 177 cm)条件下的冬季不结冰排水目标。

1.2 设计思路

1.2.1 排水渠道的冬季运行方式 引水、输水工程冬季防冻胀方式, 一般采用蓄冰、排冰、输冰、结冰盖等其中一种或综合输排冰运行方式进行^[1]。目前输水渠道冬季运行方式大致可分为 4 种, 一是蓄冰运行方式, 二是输排冰运行方式, 三是结冰盖运行方式, 四是抽水融冰运行方式^[2]。各运行方式所需要的外部条件和运行效果不同^[3], 如蓄冰运行方式是通过水库蓄冰后提高水温, 抽水融冰方式采用抽取地下水消融渠道产冰^[4], 输排冰和结冰盖运行方式需要一定的流量保证。对于必须冬季运行的引水工程, 多采用有压管道输水方式^[5]。另外采取渠道保温输水, 也是引调水工程采取的措施之一。

1.2.2 桦树沟排水渠道的冬季防结冰设计思路 渠道内水流温度的降低(或升高)主要与周围土体温度、进水口水温及水流的流速有关, 而且水流流速对流经暗渠内水温的降低的影响最大, 其次是进水口水温的变化对流经暗渠内水温的降低的影响, 土体环境温度对流经暗渠水流温度降低的影响相对较小^[6]。

某引水工程采用保温的方式实现冬季安全运行^[7]。该引水工程位于中国北方寒冷地区, 冬季寒冷, 年平均气温 6.0 ~ 10.0 °C, 历年极端最低气温 -29.6 °C, 多年平均风速 1.1 ~ 3.2 m/s。该工程渡槽中输水流速为 2.2 m/s, 渡槽断面为矩形, 规格为宽 4.40 m、高 4.00 m、壁厚 0.50 m。桦树沟排水渠断面大小与渡槽工程相似, 气候条件也基本接近。为保证冬季不间断输水, 渠身采用全封闭保温措施。研究发现, 渡槽外壁粘贴聚氨酯保温板在防止渡槽水流温度降低方面的作用明显, 减小了约 45% 的水流温度降低值, 且流速越大, 水温降低值越小; 模型试验也表明, 通过保温措施, 在较低环境温度及较高流速下, 可将渠道水温降低值控制在 1 °C 以内^[8], 从而实现渠道安全运行。

《水工建筑物抗冰冻设计规范》规定, 冬季运行明渠及输水洞明流设计流速不宜小于 1.2 m/s^[1]。新疆部分地区已建冬季运行的水电站引水渠道采用结冰盖设计, 对于寒冷地区的引水式水电站引水渠道纵坡选择考虑冬季最小流量时, 渠道流速也是按大于 1.2 m/s 考虑的^[9]。可见, 在渠道采取保温措施的基础上, 优化渠道断面形式, 增大冬季渠道水的流速是可以实现不结冰运行的。

桦树沟为常年性沟道, 排水渠改造设计既要满足洪水期排洪, 又要保证冬季不结冰过水要求。洪水季节性变化大, 雨季洪水期流量大, 冬季不断流, 但流量较小, 无法采用停止运行、蓄冰、输排冰、结冰盖、抽水融冰等运行方式安全过冬。只能通过采取保温措施, 并优化渠道断面结构, 提高渠道过流速度, 实现冬季防结冰过水的要求。

1.3 排水渠保温措施及断面优化设计

1.3.1 保温措施设计 保温设计主要是保温材料的选择及厚度的确定。渠道保温材料需要承担一定荷载^[10], 多采用挤塑聚苯乙烯板(XPS 板)材料, 《渠道防渗衬砌工程技术标准》推荐采用聚苯乙烯泡沫塑料板或高分子防渗保温卷材保温, 国内一些渠道建造或改造实例采用聚氨酯材料作为保温板^[7, 11]。聚氨酯材料导热系数较小^[12], 接近空气(表 1), 本次改造工程选用聚氨酯夹芯板作为渠道保温材料。

张宇峰等^[13]对部分高寒区灌区渠道保温防冻

表 1 不同渠道保温材料的物理参数

材料	密度 /(kg/m ³)	比热 /[J/(kg·K)]	导热系数 /[W/(m·K)]
地基砂砾石层	1 900		0.410
混凝土	2 500	970	1.740
空气		1 005	0.023
聚氨酯夹芯板	30	1 500	0.024
聚苯乙烯泡沫板	30	1 470	0.028

胀的研究表明，内蒙古河套灌区冻土层深为 1.00 ~ 1.30 m，渠道适宜保温苯板的厚度为 8.0 cm；新疆冲忽尔灌区冻土层深为 1.56 m，渠道适宜保温苯板的厚度为 10.0 cm；黑龙江蛤蟆通灌区冻土层深为 1.98 m，渠道适宜保温苯板的厚度为 12.0 cm；而位于祁连山区(冻土层深为 1.20 ~ 1.77 m)的镜铁山矿区利用张宇峰等^[13]的方法计算可知，镜铁山矿区桦树沟排水渠适宜保温苯板的厚度为 10.0 ~ 12.0 cm。由此可见，在冻胀较为严重的高寒区灌区渠道保温苯板的最佳厚度应为 8.0 ~ 12.0 cm。

按照《渠道防渗衬砌工程技术标准》(GB/T 50600—2020)规定，对于中小型渠道，保温层的适宜厚度可取设计冻深的 1/10 ~ 1/15^[14]，按设计冻深 1.20 ~ 1.77 m 计，保温层厚度为 11.8 ~ 17.7 cm。

类比工程经验及按照规范规定的保温板计算厚度方法^[14]，最终确定“U”型渠顶部采用双层聚氨酯夹芯板[12.0 cm × (200 ~ 450) cm]保温层，并包裹厚度为 0.326 mm 的铁皮。同时，在排水渠进、出口设置无机布防寒卷帘门，作为封闭式保温措施^[1]，以加强渠道的封闭性，减少渠道内外空气对流，减小空气的热交换。

1.3.2 渠道断面优化设计 桦树沟排水渠原为宽浅

式梯形断面，浆砌块石砌筑，顶宽 7.80 m、底宽 5.80 m、深 2.00 m (图 1)，原排水渠长 273 m，按地形条件分为平缓段、陡坡段、连接段 3 段，渠道比降为 6.2% ~ 65.5%。

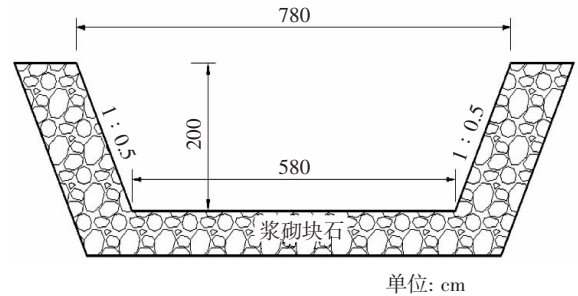


图 1 排水渠断面结构

本次断面优化设计主要考虑冻胀及增加小流量时流速及水深等因素。

镜铁山矿区场地属季节性冻土区，场地季节性冻土最大冻土深度 1.77 m。冻深范围内渠基地层为冲洪积砂砾卵石层，其天然含水量为 45 g/kg，场地内无地下水，平均冻胀率 $\eta \leq 1\%$ ，渠基土冻胀等级为 I 级，冻胀类别属不胀冻土^[15]。但由于渠道渗漏，含水量可达 120 ~ 155 g/kg，渠基土类别属不胀冻土、弱冻胀土，冻胀等级为 I ~ II 级^[15]。结合渠道防渗要求，为提高渠道防冻能力，渠道采用整体式混凝土衬砌^[14]。

桦树沟为天然沟道，排水渠道断面一方面要满足洪水期最大过水流量，另一方面，需减小渠底过流断面面积，降低冬季小流量时的流速。排水渠选用窄深且底部为圆弧的“U”型渠结构(图 2)，渠道采用 C25 钢筋砼浇筑而成。排水渠直墙段净宽 3.50 m、深 1.99 m，渠底呈弧形，弧深 1.01 m (底弧半径 2.02 m，角度为 120°)^[16-17]。

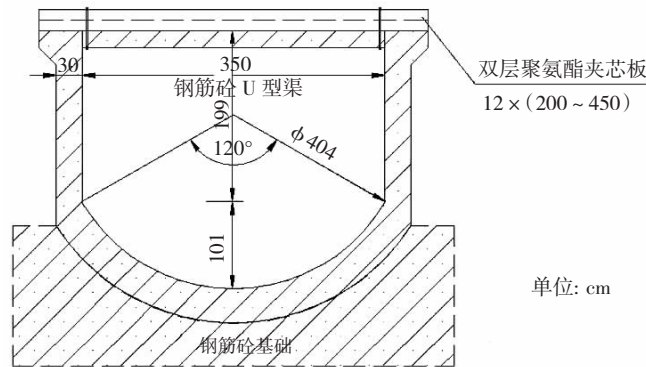


图 2 改造后排水渠断面结构

表 2 改造前后排水渠冬季水深及流速

分段	分段长 /m	比降 /‰	糙率	设计流量 /(m ³ /s)	渠道水深 /(mm)	流速 /(m/s)	过流时间 /s
改造前							
平缓段	163	6.2	0.025	0.2	33.50	1.03	158.5
陡坡段	63	65.5	0.025	0.2	16.48	2.09	30.0
连接段	47	27.4	0.025	0.2	21.41	1.61	29.5
改造后							
过渡段 1	50	13.9	0.015	0.2	78.00	3.44	14.5
平缓段	80	7.5	0.015	0.2	90.13	2.78	28.8
陡坡段	85	45.5	0.015	0.2	59.21	4.55	18.7
过渡段 2	40	15.9	0.015	0.2	75.58	3.61	11.1

通过优化排水渠纵断面布置,以桦树沟隧洞出口为起点至碎矿沟沟床,渠道划分为过渡段—平缓段—陡坡段—过渡段,渠道比降为 7.5%~45.5%。

2 排水优化改造效果分析

2.1 冬季水深及流速显著提高

排水渠水深及流速采用曼宁公式如下:

$$V_c = 1/n \cdot R_c^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

式中, V_c 为平均流速(m/s), R_c 为平均水深或水力半径(m), i 为渠道比降(以小数计), n 为渠道糙率^[5]。

将渠道按比降地形条件分为平缓段、陡坡段、连接段,按冬季最小流量 0.2 m³/s 计算,采用曼宁公式计算原渠道及优化设计后渠道内水深、流速及过流时间(表 2)。

在冬季最小过流量 0.2 m³/s 下,原渠道内水深为 16.48~33.50 mm,流速 1.03~2.09 m/s,水深较浅,大部分渠段流速小,渠道内水在 218 s 内通过渠道,水流在渠道内冻结,最终造成冰层堵塞及渗漏,渠水外溢,形成安全隐患及生态问题。

优化改造后,“U”型断面渠道最大过流量为 130.9 m³/s,满足汛期最大过流要求。在冬季最小过流量下,渠道内水深为 59.21~90.13 mm,流速可达 2.78~4.55 m/s(远大于 1.20 m/s),渠道内水在 73.1 s 内即可快速通过渠道,水深、流速明显增加,通过时间明显减少,改造效果显著。

2.2 防冰冻效果明显

桦树沟上游沟道内地表水冬季为冰盖下过水的形式,水温为 0~2 ℃。利用桦树沟排水隧洞长 567 m,平均埋深 150 m 的保温过水能力,通过隧

洞地温与水体的热交换,隧洞出口段水温提高 2~3 ℃。但由于原渠道内水深小,流速小,且为开敞式,隧洞至渠道后,水流迅速降温而结冰。

桦树沟排水渠改造工程将原宽浅式梯形渠改造为窄深式“U”型渠,加之渠道保温及进出口封闭措施,有效减缓了渠道内水温的降低,经测量,渠道出口段水温达 1~2 ℃,从而将渠道水温降低值控制在 1~2 ℃以内,实现了排水渠冬季无结冰过流。

桦树沟排水渠于 2019 年完成施工,经过 2019—2023 年 4 个冬季的运行,效果良好,证明渠道保温运行及增大冬季渠道水流速的优化设计是可行的。

3 讨论与小结

由于桦树沟排水渠冬季流量较小,无法采用常规的蓄冰、排冰、输冰、结冰盖等措施实现渠道不结冰运行。采用人工改造方式对镜铁山矿区桦树沟排水渠进行改造,改造结果表明,桦树沟排水渠改造工程采取渠顶设聚氨酯夹芯板保温层,在进出口采用防寒门进行保温封闭等措施,并将原宽浅式梯形渠改造为窄深式“U”型渠,以增加小流量时的过流速度,在过流速度较快的前提下,将渠道水温降低值控制在 1~2 ℃以内,实现了渠道冬季无结冰过流运行。

为保证冬季小流量时不结冰排水,桦树沟排水渠改造工程主要采取两个方面措施,一是采取保温防寒措施,减少水流与外界的热交换,二是加大流速(一般大于 1.20 m/s),尽量使渠道内水快速通过。工程实施后经过四个冬季的安全运行,证明防寒保温、增大流速的综合防冰冻措施是可

行的,可以实现高寒地区小流量渠道的冬季不结冰安全运行。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准 水工建筑物抗冰冻设计规范: GB/T 50662—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [2] 白俊岭, 孙亮科. 寒冷地区引水式电站冬季结冰盖运行渠道设计与研究[J]. 海河水利, 2021(1): 43-46.
- [3] 席燕林. 寒冷地区电站长距离输水明渠冬季运行方式探讨[J]. 水利水电技术, 2015, 46(12): 85-89.
- [4] 丁 磊. 新疆北疆地区引水式电站冬季排冰措施[J]. 西北水电, 2015(3): 36-38.
- [5] 刘德仁, 杨 成. 寒冷地区无压输水渡槽冬季运行模型试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(4): 56-59.
- [6] 刘德仁, 赖远明, 张 东, 等. 寒冷地区无压输水暗渠运行模型试验研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1323-1329.
- [7] 刘德仁, 张 东, 张世民. 北方寒冷地区封闭渡槽粘贴聚氨酯板提高保温效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 70-75.
- [8] 李 纲, 方忠鹏. 青藏高原渠道(渡槽)冬季供水防冻保温的可行性分析[J]. 水利技术监督, 2019(6): 73-79; 91.
- [9] 吴建良. 严寒高海拔地区水电站引水渠道设计[J]. 西北水电, 2016(1): 33-36.
- [10] 鹿翔宇, 刘仰玉, 卞汉兵, 等. 挤塑聚苯板在混凝土衬砌渠道冻胀防治中的应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(3): 460-467.
- [11] 张 栋, 银英姿, 杨宏志. 聚氨酯保温板在内蒙古临河南边渠试验场中的应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 195-200.
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国建材行业标准 喷涂聚氨酯硬泡体保温材料: JC/T998—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [13] 张宇峰, 何武全, 赵彦琳. 渠道保温防冻胀中冻土层等效导热系数的计算[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(6): 69-73.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 中华人民共和国国家标准 渠道防渗衬砌工程技术标准: GB/T 50600—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [16] 宁夏水利水电勘测设计有限公司. 镜铁山矿矿区河堤塌陷段隐患治理及排水渠道改造工程初步设计报告[R]. 银川: 宁夏水利水电勘测设计有限公司, 2017.
- [17] 宁夏水利水电勘测设计有限公司. 镜铁山矿矿区河堤塌陷段隐患治理及排水渠道改造工程施工图设计[R]. 银川: 宁夏水利水电勘测设计有限公司, 2018.