

甘肃景电一期灌区渠道防渗防冻胀技术应用

1. 灌区概况

景泰川电力提灌工程位于甘肃省中部，河西走廊东端，省城兰州以北 180km 处；横跨甘蒙两省区的景泰、古浪、民勤、阿拉善左旗等四县（旗）。灌区东临黄河，北与腾格里沙漠接壤，干旱少雨、风沙多，属于干旱型大陆性气候；灌区范围内地表径流和地下水都很匮乏，灌溉水源来自从黄河提水。

景电工程是大 II 型提水灌溉工程，总体规划、分期建设。工程设计流量 28.6 立方米/秒，加大流量 33 立方米/秒，兴建泵站 43 座，装机容量 27 万千瓦，控制灌溉面积 100 万亩。

一期工程：1969 年开工建设，1971 年上水。建成泵站 13 座，装机容量 7.75 万千瓦，总扬程 472 米；修建干支斗农 4 级渠系，干支渠渠道 20 条 228 公里，建筑物 980 座。工程设计流量 10.6 立方米/秒，加大流量 12 立方米/秒，年提水量 1.48 亿立方米，设计灌溉面积 30.42 万亩。现状斗渠以上渠道衬砌率达到 85%，工程设施完好率 56%，灌区有效灌溉面积 28.42 万亩，亩均毛灌溉用水量 520m³/亩，复种指数 112%。

二期工程：1984 年开工建设，1987 年投入运行。建成泵站 30 座，装机容量 19.25 万千瓦，总扬程 713 米；修建干支斗农 4 级渠系，干支渠渠道 47 条 451 公里，建筑物 2519 座。设计流量 18 立方米/秒，加大流量 21 立方米/秒，年提水量 2.66 亿立方米，设计灌溉面积 52.05 万亩。现状斗渠以上渠道衬砌率达到

80%以上，工程设施完好率 51%，灌区现状有效灌溉面积 45.55 万亩，亩均毛灌溉用水量 $530\text{m}^3/\text{亩}$ ，复种指数 108%。

景电二期延伸向民勤调水工程：景电二期延伸向民勤调水工程，是一项利用景电二期工程的灌溉间隙和空闲容量向民勤调水，以缓解民勤水资源日趋减少、土地沙化、生态环境恶化的应急工程。1995 年开工，2001 年 3 月开始向民勤调水。建成明渠 14.14 公里，沙漠输水暗渠 84.90 公里。设计流量 6 立方米/秒，年调水量 6100 万立方米，恢复灌溉面积 15.2 万亩。

景电灌区经过四十年的开发建设管理，从根本上改变了灌区农业生产基本条件，在腾格里沙漠南缘形成了一千多平方公里的绿洲，使昔日荒无人烟、寸草不生的景泰川变成了今日的产粮基地，产生了显著的社会、经济和生态环境效益。

社会效益：灌区新建 10 个乡镇、178 所学校和 123 所医院（所），安置移民 32 万人。解决了灌区 40 万人和 100 多万头牲畜的饮水困难。

经济效益：截止 2008 年，全灌区累计生产粮食 54.44 亿公斤，经济作物 20.82 亿公斤，累计产生直接经济效益 63.88 亿元，是工程总投资的 8 倍。

生态效益：灌区林木覆盖率达到 14%，近百万亩的灌区与三北防护林带连成一片，阻止了腾格里沙漠的南侵，灌区小气候得到了显著改善。据工程上水前后 42 年的气象资料对比，灌区建成后年平均降水量由 185mm 增加到 201.6mm，相对湿度由 46% 增加到 48%，平均风速由 3.5m/s 降低到 2.4m/s，年 8 级以上大

风日数由 29 天减为 14 天，年蒸发量由 3390mm 降低到 2433mm。

景电一期灌区支渠以上渠道工程建设时由于当时受经济条件的限制，渠道仅采用混凝土板衬砌，部分渠道换填了砂碎石，没有采取其他的防渗和防冻胀措施，灌区支渠以上渠道经过近 40 年的运行，渠道冻胀破坏严重，淤积、滑塌现象时有发生，渗漏水现象严重，渠系水的利用系数降低，输水时间长，灌溉效率低。近几年，随着景电一期灌区续建配套与节水改造项目的实施，景电一期灌区支渠以上渠道工程在改造时，针对渠道不同情况，采取了不同的渠道衬砌防渗防冻胀技术措施，有效缓解和解决了渠道的渗漏和冻胀等问题，提高了渠道工程的质量和使用寿命。

景电二期灌区斗渠以上各级渠道均采用了混凝土板全断面衬砌。渠道因地质条件不同，断面设计及衬砌形式也不同，总干渠设计断面分“土基渠道”和“石基渠道”两种，“土基渠道”为梯形断面，防渗结构为沥青玻璃丝布或 0.2 毫米厚聚乙烯防渗膜、3 厘米厚砂浆垫层、混凝土板衬砌；“石基渠道”混凝土板衬砌设计断面分梯形和矩形两种，梯形断面设计边坡大，为不等厚混凝土板衬砌结构；矩形断面设计为重力式浆砌石挡土墙并套衬混凝土预制板或现浇混凝土。支渠多采用梯形、梯弧形和“U”型衬砌形式，梯形、梯弧形设有沥青玻璃丝布或 0.2 毫米厚聚乙烯防渗膜。防冻胀措施因各种因素，未充分考虑。工程经过近 20 多年的运行，因渠道渗漏水、灌溉回归水等因素地下水位上

升，渠道冻胀破坏破坏日益显现，特别是梯形渠段冻胀破坏尤为严重，对渠道的安全运行造成威胁。二期灌区的更新改造已迫在眉睫。

景电二期延伸向民勤调水干渠明渠段工程建设时采用聚乙烯防渗膜加混凝土板衬砌结构，渠道横穿灌区，受灌溉回归水和渠道渗漏水的影响，经过近 10 多年的运行，渠道冻胀破坏严重，部分渠段滑塌，渠道的安全运行受到威胁。

2. 灌区渠道防渗防冻胀技术措施的应用情况

景电灌区渠道以挖方渠道、填方渠道两种形式居多。挖方渠道又以有地下水、无地下水区分；填方渠道大多无地下水。对于挖方（且无地下水）的渠道，在渠道的更新改造中，大多采用换填砂碎石、铺设聚乙烯防渗膜、砂浆垫层、混凝土预制板衬砌结构。砂碎石换填厚度为 30 厘米到 80 厘米不等，干、支渠铺设的防渗膜厚度分别为 0.20 毫米和 0.18 毫米，砂浆垫层的厚度为 3 厘米，混凝土预制板的厚度为 6.3 厘米；部分支渠段采用聚苯乙烯保温板、铺设聚乙烯防渗膜、砂浆垫层、混凝土预制板衬砌结构。聚苯乙烯保温板厚度为 8 厘米，防渗膜厚度 0.2 毫米，砂浆垫层的厚度为 3 厘米，混凝土预制板的厚度为 6.3 厘米。有地下水的渠道，在渠道的更新改造中，采用渠底盲沟铺设 ϕ 160PVC 排水花管，排水花管周围夯填反滤料，使地下水从排水花管排走。对于地下水特别丰富且地下水位高、冻胀破坏严重的渠道，除采用暗埋排水花管排水措施外，为了抵抗渠道的冻胀，采用较大体

积的浆砌石衬砌渠道。

景电一期灌区续建配套与节水改造项目自实施以来，在渠道工程的更新改造中，渠道的防渗抗冻胀问题一直是改造工程任务的重中之重，采取以上针对不同地质及运行情况处理渠道的防渗抗冻胀措施，渠道的运行安全可靠，基本杜绝了渠道的冻胀问题，渠道的渗漏水损失大为降低，提高了渠道的输水能力和灌溉效率。

3. 典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施

景电一期灌区支渠以上渠道工程，土壤地质条件复杂，总干渠穿越灌区段地下水特别丰富且地下水位高，支渠大部分穿越灌区，灌溉回归水和渠道渗漏水使渠堤长期处于水饱和状态，冬季渠道停水期和春季消融期，渠堤饱和水的冻胀与消融，对渠道造成严重的冻胀破坏导致渠道滑坡。为此，景电一期灌区在解决渠道防渗抗冻胀问题上狠下功夫，针对不同渠道的地质及运行情况，现特选以下几段渠道作为典型案例进行分析，主要做法有：

① 西干三支渠渠道防渗防冻胀改造

西干三支渠全长 10.2km，设计流量 1.1m³/s，加大流量 1.3m³/s，渠道设计纵坡 1/2000，渠道断面为梯形，边坡系数 1: 1.5，底宽 50cm，渠深 115cm，预制混凝土板衬砌，糙率 0.017。

西干三支渠大部分为半挖半填或挖方渠道，局部地段为深挖方渠道。改造的 5+400 ~ 7+686 渠段大部分为半挖半填渠道，局部地段为挖方渠道，渠床均为亚粘土；部分渠道冻胀严重。改造

时对冻胀破坏严重的 158m 渠道采用预制 C15 混凝土板、聚乙烯防渗膜、砂碎石垫层的防渗防冻胀改造方案，如图 1；对其它 2128m 渠道采用预制 C15 混凝土板、聚乙烯防渗膜防渗改造方案，如图 2。

采用以上渠道防渗防冻胀改造措施后，渠道冻胀问题得到解决，渗漏水损失减少，渠道的输水能力显著提高，安全运行得到了保障。

② 西干九支渠渠道防渗防冻胀改造

西干九支渠全长 14.4km，设计流量 $1.8\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $2.1\text{m}^3/\text{s}$ ，渠道设计纵坡 1/2000，渠道断面为梯形，边坡系数 1: 1.5，底宽 50cm，渠深 150cm，预制混凝土板衬砌，糙率 0.017。

改造的 0+905 ~ 1+600 段渠道渠床为盘山半挖半填风化严重的破碎岩石及碎石土渠床，渠道所处位置均较高，没有地下水；渠床含水来自渠道渗水，渠道纵坡缓，渠道三分之二的断面被淤积，渠道表现为冻胀，衬砌混凝土板开裂、滑塌，老化破损严重。改造时采用采用裁弯取直和改线相结合的方案，裁弯取直段开挖岩石及碎石土，使渠床座落在岩石上，改线填方段采用碎石土(砂壤土 40%，碎石土 60%)填筑。渠道衬砌结构从下到上依次为 0.2mm 厚聚乙烯防渗膜，3cm 厚 M₅ 水泥砂浆垫层，6.3cm 厚 C15 混凝土预制板，如图 3。

采用以上渠道改造措施后，渠道冻胀破坏问题得到解决，渗漏水损失减少，渠道的输水能力显著提高，安全运行得到了保障，

也给渠道的运行管理带来了极大的方便。

③ 西干八支渠渠道防渗防冻胀改造

西干九支渠全长 18.8km，渠道设计纵坡 1/2000，渠道断面为梯形，边坡系数 1: 1.5，预制混凝土板衬砌，糙率 0.017。渠床均为亚砂土夹亚粘土地基；渠道两侧因受周围农田灌溉回归水影响，地下水较高。

改造的 0+000 ~ 2+700 段渠道设计流量 $1.8\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $2.1\text{m}^3/\text{s}$ ，设计水深 104 cm，加大水深 111cm，底宽 50cm，渠深 150cm。该段渠道地下水位较高，受冻胀破坏，混凝土板开裂、滑塌破坏严重，直接影响渠道的安全运行和输水能力。改造时采用预制 C15 混凝土板、聚乙烯塑防渗层、30 ~ 60 cm 砂砾石层置换渠底冻土层的的防渗防冻胀改造方案，如图 4；

改造的 15+016 ~ 16+476 段渠道设计流量 $1.08\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $1.18\text{m}^3/\text{s}$ ，设计水深 83.7cm，加大水深 87cm，底宽 50cm，渠深 120cm。由于渠道两侧紧靠农田，道路狭窄，砂砾石垫层运输及渠床基础开挖难度大，改造时采用铺设聚苯乙烯硬质泡沫保温板防渗防冻胀衬砌结构，渠道衬砌结构从下到上依次为 8cm 厚聚苯乙烯硬质泡沫保温板，0.18mm 厚聚乙烯防渗膜，3cm 厚 M₅ 水泥砂浆垫层，6.3cm 厚 C15 混凝土预制板，如图 5。

采用以上渠道改造措施后，渠道冻胀破坏问题得到解决，渗漏水损失减少，渠道的输水能力显著提高，安全运行得到了保障。

④ 西干八道泉公路桥至西二泵前池间渠道防渗防冻胀改造

本段渠道为深挖方渠道，设计流量 $6.87\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $8.12\text{m}^3/\text{s}$ ，设计纵坡 $1/5000$ ，渠道断面为梯形，边坡系数 $1:1.5$ 。其中 $7+983\sim 8+161$ 段 178m 渠道原为混凝土预制板衬砌结构， $8+161\sim 8+367$ 段 206m 渠道为浆砌石衬砌结构。 $7+983\sim 8+161$ 段的渠坡及渠底和 $8+161\sim 8+367$ 段的渠坡上部为亚砂土及碎石土渠床； $8+161\sim 8+367$ 段的渠坡下部及渠底为泥质砂岩夹片岩渠床； $7+983\sim 8+161$ 段渠道地下水位低于渠底，渠道表现为冻胀破坏、滑塌； $8+161\sim 8+367$ 段渠道的渠坡下部及渠底有地下水出露，渠道表现为地下水侵蚀、冻胀和渠床软化、滑塌破坏。改造时，对 $7+983\sim 8+161$ 段渠道采用防渗防冻胀改造方案；对 $8+161\sim 8+367$ 段渠道采用防渗防冻胀和排水相结合的改造方案。两段渠道衬砌结构从下到上依次为 $30\sim 60\text{cm}$ 厚砂碎石垫层、 0.2mm 厚聚乙烯防渗膜， 3cm 厚 M_5 水泥砂浆垫层，渠坡下部及渠底 10cm 厚 $C15$ 混凝土预制板，渠坡上部及封顶板 6.3cm 厚 $C15$ 混凝土预制板。 $8+161\sim 8+367$ 段渠道渠底下部设排水盲沟，盲沟中设置一条 $\phi 160\text{PVC}$ 排水花管，周围填筑筛分反滤料，与西二泵前池底板下部的排水花管接通，将渠床中的地下水汇集到前池右侧设置的集水井，由自动排水系统及时排出。如图 6。

采用以上渠道改造措施后，渠道冻胀破坏问题得到解决，渠道地下水位明显降低，地下水对渠道的反压力减轻，渗漏水损失减少，渠道的输水能力显著提高，安全运行得到了保障。

⑤ 西干四泵站出水池下游渠道防渗防冻胀改造

本段渠道(15+238~15+638)设计流量 $3.50\text{m}^3/\text{s}$,加大流量 $4.50\text{m}^3/\text{s}$,设计纵坡 $1/3000$,渠道断面为梯形,底宽 83cm ,边坡系数 $1:1.5$ 。渠道为傍山和穿山岩石渠床混凝土预制板衬砌结构,途径沟道处为亚砂土夹碎石渣渠床,夯填质量差,渗漏水严重,渠道弯道多,水流不畅。改造时采用裁弯取直和防渗漏的改造方案。衬砌结构从下到上依次为 0.2mm 厚聚乙烯防渗膜, 3cm 厚 M_5 水泥砂浆垫层,渠坡下部及渠底 10cm 厚 $C15$ 混凝土预制板,渠坡上部及封顶板 6.3cm 厚 $C15$ 混凝土预制板。如图7。

采用以上渠道改造措施后,渠道渗漏水问题得到解决,渗漏水损失减少,渠道水流顺畅,渠道的输水能力显著提高,安全运行得到了保障。

⑥ 总干渠独一农至倒虹吸间游渠道防渗防冻胀改造

本段渠道位于总干四至五泵站间,原设计流量 $10.56\text{m}^3/\text{s}$,加大流量 $12\text{m}^3/\text{s}$,设计纵坡 $1/4500$,边坡系数 $1:1.5$,渠道原设计断面形式和衬砌结构为梯形混凝土预制板衬砌结构,渠床为砂碎石换基,渠底及阴坡下部砂碎石垫层厚 70cm ,阴坡上部及整个阳坡砂碎石垫层厚 $30\sim 50\text{cm}$ 。

本段渠道处于全灌区最低洼地段,为特殊的强冻胀渠段。渠床土质为强冻胀性的亚砂土夹亚粘土,地下水高出渠底 $0.5\sim 1\text{m}$,且不易排出。由于渠道的特殊水文地质条件,砂碎石垫层的孔隙被渠水中携带的泥沙所填充,渠道的老化破损表现为严重的冻胀破坏。在阴阳坡不平衡强冻胀力的作用下,阴坡的混凝土板严重

鼓起并沿渠坡向下滑动，阳坡的混凝土板沿渠坡向上滑动，将平台板顶起；由于冻胀、消融的交替作用，渠道阴坡的混凝土板鼓胀、隆起、滑塌，从而使整个渠道的混凝土板衬砌结构遭到严重破坏。

根据本段渠道特殊的工程水文地质条件和冻胀破坏特点，改造时采用矩形断面 M10 水泥砂浆砌块石重力墙结构形式，渠道侧墙顶宽 50cm, 底宽 150 cm, 底板厚 60 cm, 整个渠底铺设 30 cm 厚干砌块石并上铺 20cm 厚砂碎石垫层。渠底下部设置深 120cm 的梯形砂碎石反滤排水沟，沟内设置 2 条 ϕ 160PVC 排水花管，并在砂碎石反滤料与渠底间布设一层反滤布，排水花管上包裹一层反滤布，将渠道地下水排入横穿本段渠道 12+748 处的灌区总干排水沟。如图 8。

采用以上渠道改造措施后，彻底解决了渠道的冻胀问题，渠道整体结构稳定，渠道内再无地下水出露，渗漏水损失减少，渠道水流顺畅，渠道的输水能力显著提高，安全运行得到了保障。

⑦总干渠 4#隧洞出口至独一农间渠道防渗防冻胀改造

本段渠道长 240m, 原设计流量 $10.56\text{m}^3/\text{s}$, 加大流量 $12\text{m}^3/\text{s}$, 设计纵坡 1/3000, 边坡系数 1: 0.5, 渠道原设计断面形式和衬砌结构为梯形现浇混凝土结构。

本段渠道处于全灌区最低洼地段，为深挖方岩石渠道，地下水高出渠底 0.3 ~ 0.5m, 且不易排出。由于水流冲刷、高矿化度地下水的侵蚀、冻溶、冻胀破坏，渠底鼓胀、隆起、开裂，渠坡

下部混凝土严重开裂、剥落，渠床岩石软化，部分渠段渠坡后侧渠床疏松、塌陷，渠坡混凝土开裂垮塌。

根据本段渠道特殊的工程水文地质条件和冻胀破坏特点，改造时采用预制混凝土板套衬，并在下部设置排水盲沟加设排水花管的改造方案。具体做法是将渠道边坡系数由 1:0.5 调整到 1:0.6，拆除已开裂、剥落、垮塌的渠底及渠坡混凝土，并开挖清理渠床软化、疏松层至坚硬岩石，用 M10 水泥砂浆砌块石加固衬砌拆除部位的渠坡，渠底现浇 12cm 厚 C15 混凝土；保留与渠床粘贴牢固部位的原渠坡混凝土结构层，并将其凿毛冲洗干净；用 M10 水泥砂浆套衬 C15 混凝土预制板，渠坡下部及渠底和渠坡上部及封顶板 C15 混凝土预制板的厚度分别为 10cm 和 6.3cm。渠底下部设置深 80cm 的梯形砂碎石反滤排水沟，沟内设置 2 条 $\phi 160$ PVC 排水花管，排水花管上包裹一层反滤布，将渠道地下水汇入排水沟（管）内再排入横穿总干渠 12+748 处的灌区总干排水沟，以保证渠道衬砌结构免受地下水的侵蚀。如图 9。

采用以上渠道改造措施后，彻底解决了渠道的冻胀问题，渠道、渠坡整体结构稳定，渠道内再无地下水出露，渗漏水损失减少，渠道水流顺畅，渠道的输水能力显著提高，安全运行得到了保障。

4. 防渗防冻胀技术措施应用的体会和经验

景电一期灌区建成于上世纪七十年代，灌区的建成为当地社会经济的发展和改善人民群众的生产生活条件做出了巨大贡献。

但是由于工程所处的自然地质情况较为复杂，加上工程已运行 40 多年，渠道及其建筑物冻胀老化破损严重，渠道渗漏水损失大，渠道的输水能力降低，运行安全系数低，工程的管理难度较大。自 1998 年起，景电一期灌区被国家列入大型灌区续建配套与节水改造项目实施以来，渠道的防渗防冻胀问题始终做为渠道改造的关键技术问题。对挖方且有地下水的渠道，采用换填砂碎石、渠底设置盲沟及排水花管，铺设聚乙烯防渗膜、混凝土预制板衬砌等防渗防冻胀措施，可以有效地防止渠道的冻胀并减少渠道水渗漏，大大提高渠道运行的稳定性和输水能力，保障渠道的安全运行；对强冻胀且地下水位高的渠道，采用大体积的浆砌石衬砌并运用排水盲沟及排水花管将地下水排出渠道的抗冻胀措施，可以有效地降低渠道地下水位，大大提高渠道的抗冻胀能力，从而保证渠道运行的稳定性和输水能力；对于渗漏、冻胀破坏严重、渠道运行水深较小且砂碎石运输和渠道开挖难度大的渠道，采用聚苯乙烯硬质泡沫保温板、聚乙烯防渗膜、水泥砂浆垫层，混凝土预制板衬砌等防渗防冻胀措施，可以减轻施工的难度，并能够有效地解决渠道的防渗防冻胀问题，提高渠道运行的稳定性和输水能力，从而保证了渠道的灌溉能力；对于原现浇混凝土衬砌、地下水位较高且渗漏、冻胀破坏严重的渠道，采用水泥砂浆套衬混凝土预制板并运用排水盲沟及排水花管将地下水排出渠道的抗冻胀措施，可以有效地降低渠道地下水位，大大提高渠道的抗冻胀能力和渠道运行的稳定性，有效地改善了渠道的运行状

况；对于半挖半填、傍山和穿山岩石渠床且弯道较多的渠道，采用裁弯取直和铺设聚乙烯防渗膜、水泥砂浆垫层、混凝土预制板衬砌等防渗防冻胀措施，有效地减少了渠道的渗漏水损失，提高了渠道的输水能力，同时有效防止了由渗漏水的冻胀与消融对渠道造成的冻胀破坏，大大提高了渠道的安全运行系数。另外，应针对渠道设计流量与渠深的大小，衬砌混凝土预制板的厚度要有一定的区别，在景电一期灌区更新改造工程中，支渠及北干渠工程衬砌混凝土预制板的厚度全为 6.3cm，总干及西干渠工程渠坡下部及渠底和渠坡上部及封顶板混凝土预制板的厚度分别为 10cm 和 6.3cm。

渠道的防渗防冻胀措施的研究与应用，在景电一期灌区改造中起到了很好的作用，为提高渠道的稳定性和抗冻胀性能、减少渠道输水的渗漏、提高渠道的输水能力和灌溉效率起到了十分重要的作用，在灌区的更新改造中，始终要把渠道的防渗防冻胀措施的研究与应用作为一项永恒的课题。

5. 存在的问题及建议

在景电一期灌区更新改造工程的建设中，虽然针对渠道所处的不同自然地质情况、环境状况采取了不同的防渗防冻胀处理措施，取得了良好的效果，但还存在一些问题，主要表现在：一是对换基砂碎石的级配把握的不够，存在一定的难度，换基的厚度把握的不准；二是换基砂碎石的夯填质量很难控制，有时的夯填质量差，造成渠道小面积沉陷；三是地下水排水系统的设置增加

了工程运行管理上的工作量（工程上水运行期间，要关闭出水闸阀，工程停水运行期间，要打开出水闸阀）；四是大体积浆砌石衬砌渠道时，对浆砌石的砌筑质量、伸缩缝止水带的架设工艺要求高，对工程的施工质量要求高；五是混凝土预制板套衬渠道对保留的原混凝土表面凿毛和对渠道边坡系数的控制要求高，施工质量差时会造成渠道整体滑坡。

针对以上存在的问题，建议在采用以上已应用的渠道防渗防冻胀处理措施时，一定要根据渠道所处的不同自然地质情况、环境状况采取不同的防渗防冻胀处理措施，因地制宜，区别对待，同时要加强施工质量管理和工程运行的维护与管理，随时处理出现的一些小问题，以避免造成大的问题，为工程的良性运行创造条件，使工程改造建设的成就得以持续、稳定、正常、健康地发挥效益。