

新疆生产建设兵团北疆典型区、内蒙古河套灌区
渠道防渗防冻胀技术应用模式与经验

中国灌溉排水发展中心

目 录

- 一、 我国渠道防渗防冻胀技术应用概况 - 1 -
- 二、 新疆兵团北疆典型区渠道防渗防冻胀技术应用 - 2 -
 - (一) 概况.....- 2 -
 - (二) 典型区渠系工程基本情况- 4 -
 - 1、 自然和社会经济概况..... - 4 -
 - 2、 渠系工程地质条件..... - 4 -
 - 3、 渠系工程现状情况..... - 5 -
 - (三) 渠道冻胀破坏的影响因素分析- 6 -
 - 1、 大气负温 - 6 -
 - 2、 渠床土质 - 7 -
 - 3、 地下水埋深 - 7 -
 - 4、 渠道运行方式 - 8 -
 - (四) 典型渠道防渗工程及抗冻胀技术措施- 8 -
 - 1、 典型渠道防渗工程..... - 8 -
 - 2、 典型渠道防冻胀措施..... - 12 -
 - (五) 渠道防渗防冻胀技术要点- 14 -
 - 1、 渠道设计 - 14 -
 - 2、 渠道施工 - 16 -
 - 3、 运行管理 - 16 -
- 三、 内蒙古河套灌区渠道防渗防冻胀技术应用 - 17 -
 - (一) 河套灌区概况.....- 17 -
 - 1、 灌区地理位置 - 17 -

2、 水文、气象及水资源条件..... - 17 -

3、 水文地质与工程地质条件..... - 20 -

4、 社会经济状况 - 23 -

5、 灌区渠道防渗工程现状..... - 24 -

(二) 河套灌区衬砌工程采取防冻胀措施的必要性- 24 -

(三) 河套灌区节水改造工程渠道防渗防冻胀措施应用情况- 27 -

1、 河套灌区渠道防渗结构形式..... - 27 -

2、 河套灌区渠道防冻胀结构形式..... - 27 -

3、 河套灌区渠道防渗防冻胀技术措施应用..... - 28 -

4、 几点体会 - 32 -

一、我国渠道防渗防冻胀技术应用概况

灌溉渠道是灌区水利工程的主要组成部分，是把灌溉水从水源输配到田间不可缺少的工程设施。采用各种渠道防渗衬砌技术措施，不仅可以有效减少渠道输水过程中水的渗漏损失，大幅度提高渠系水的利用系数，而且可以显著提高渠道运行的安全性和输水效率，是灌区节水改造工程建设的主要内容。

然而，在我国北方寒冷地区，由于负温的作用和影响，很多已建的渠道衬砌与防渗工程都不同程度遭受到冻胀破坏，不仅影响了工程的正常运行，增加了工程管理维护的难度和费用，也影响了防渗效果，有的甚至完全失去了防渗的作用。其主要原因是没有充分认识渠基土的冻胀规律，多数渠道衬砌与防渗工程规划设计时，没有充分考虑负温作用下基土特有的物理力学性质以及渠道冬季运行的特点。因此，在新建或改建渠道衬砌与防渗工程设计时，必须根据工程所在地的具体情况，采取必要的冻害防治措施，减轻或避免冻害破坏，提高其抗冻胀性能，延长工程的使用寿命，充分发挥渠道衬砌与防渗工程的作用和效益。

我国渠道衬砌与防渗常用混凝土、石料、膜料、沥青混凝土、土料和水泥土等材料作为防渗层，以达到防渗的目的。随着科学技术的进步与发展，防渗新工艺、新结构和新材料的应用，使我国渠道衬砌与防渗技术得到较快的发展，近年来将高分子材料应用在渠道防渗方面，尤其是高分子复合材料和复合结构研究方面取得了大量成果，成为今后研究和推广的方向。在防渗材料方面，普遍采用膜料、复合土工膜等作为防渗材料，一般可减少渗漏量的 90% 以上，而且埋入地下后避免了紫外线和光的照射，大大延缓了老化速度，延长了使用寿命，一般使用可达 20 ~ 30 年左右；在渠道防渗断面形

式方面，多采用 U 形、弧形渠底梯形和弧形坡脚梯形等新的形式，这些断面形式具有防渗效果好、水流条件佳、占地少、适应冻胀变形能力强、技术经济性好、使用寿命长等优点。U 形适宜于小型渠道，弧形渠底梯形适宜于中型渠道，弧形坡脚梯形适宜于地下水位埋深浅的大、中型渠道；在防治冻害技术方面，我国经多年研究和实践，提出了“允许一定冻胀位移量”的设计标准，采用“适应削减冻胀”的防冻害原则和技术措施，大大降低了工程造价，通过采用新的断面形式、结构形式、铺设保温板、换填非冻土材料以及加强运行管理等技术措施，可有效治理渠道冻害，提高渠道防渗工程的建设质量和使用寿命。

二、新疆兵团北疆典型区渠道防渗防冻胀技术应用

（一）概况

新疆生产建设兵团位于新疆维吾尔自治区境内，总人口 258.47 万人，土地总面积 745.62 万 hm^2 。兵团所处地区属内陆干旱区域，年均降水量稀少，降水多分布在冬季非灌溉季节，雨水补给灌溉水极少，年蒸发量则相当于年降雨量的十到几十倍，属于“没有灌溉就没有农业”的完全灌溉农业区。兵团多年平均可利用的水资源总量为 143.26 亿 m^3 ，水利工程年供水能力为 135.42 亿 m^3 ，总灌溉面积 1946.49 万亩。多年来，兵团大力开展了农田水利工程建设，已建成较为完善的水利设施，基本形成了引、蓄、输、灌、排功能齐全的农业灌排水系统，建成水库 125 座，总库容 32.73 亿 m^3 ，拥有机电井 12892 眼，水闸 114 座，堤防建设 2374.57 公里；建成各级灌溉渠道 10 万余公里及配套的渠系建筑物，已防渗渠道 2.77 万公里，渠道防渗率（按长度计算）27.70%，其中：斗渠以上渠道总长度 44282.75 公里，已防渗 25065.52 公里，防渗率 56.60%（干渠

总长度 8958.35 公里，已防渗 5755.27 公里，防渗率 64.24%；支、斗渠总长度 35324.40 公里，已防渗 19310.25 公里，防渗率 54.67%）。近年来，为进一步提高兵团水资源利用效率和效益，兵团通过采取政策引导等措施千方百计争取资金，不断加大水利投资，大力发展节水灌溉，到 2009 年 12 月，兵团应用高新节水灌溉面积已超过 1000 万亩，有效地提高了田间用水效率，对灌溉用水效率总体水平起到了一定的拉升作用。兵团多为通过渠道进行长距离输水和配水，因而在各类节水工程措施中，渠道防渗对提高农业灌溉用水效率的作用至关重要，渠道防渗工程技术是为减少渠床土壤透水性或建立不易透水的防护层而采取的各种工程措施，防渗渠道护面材料有多种，混凝土护面材料因具有防渗效果好、抗冲、耐磨、糙率低、施工方便等优点，适用于所有的灌溉渠道，是应用最广泛的渠道防渗工程技术措施之一。然而，在西北季节性冻土地区的混凝土防渗渠道由于渠基冻胀的原因破坏严重，使防渗渠道衬砌开裂漏水达不到防渗的目的，故防止渠道冻胀破坏是渠道衬砌发挥防渗作用的前提和基础，在灌区节水改造中必须重视和采取必要的技术措施解决渠道防渗衬砌冻胀破坏的问题。

多年来兵团围绕大型灌区续建配套与节水改造项目的实施，开展了针对不同材料、不同技术措施的防渗防冻胀试验研究和探索，在渠道防渗和渠道抗冻技术应用方面做了很多工作，取得了良好的成效，特别是在混凝土及塑料薄膜等防渗、防冻胀技术应用方面，积累了许多成功的经验和模式，并在一定区域得到了推广与应用，推动了兵团渠系改造工程建设质量的不断提升，有效提高了兵团农业灌溉用水的效率和效益。

（二）典型区渠系工程基本情况

1、自然和社会经济概况

典型区位于北疆的奎屯、石河子、塔城和阿勒泰地区，属典型的大陆性干旱气候，冬季长而寒冷，夏季短而炎热，日照充足，热量丰富，昼夜温差大，降水量稀少、蒸发量大、空气干燥、日温差大。年平均气温 3.6°C - 7.0°C ，一月份平均温度 -16°C ~ -18.6°C ，七月份平均温度 25°C - 26°C ，极端最高温度 40.3°C 左右，极端最低温度 -33.3°C ~ -49.0°C ，无霜期 119 ~ 191 天,最短 74 天，年降雨量 87 ~ 474.8mm，年蒸发量 1710 ~ 1995.4mm，平均最大风速 14m/s，瞬时最大风速 25-40m/s，冻土深度 1.2 ~ 1.64m。日照 2318h ~ 2732h。调研区无霜期短而变化大，热量不足，多灾害天气,主要有干旱、大风、干热风、冰雹、霜冻等，其中大风及冰雹在春夏两季发生较多，对农业生产影响较大，对水利工程建设、运行管理造成一定程度的威胁。区内总人口 100 万人，耕地总面积约 840 万亩，灌溉面积 706.17 万亩左右，节水灌溉面积 300 万亩左右，主要以种植小麦、棉花、油料作物为主。

2、渠系工程地质条件

该区域内新生代地层十分发育，自侏罗系到第四系广泛分布，无论砂岩、砂砾岩乃至泥岩，均系一整套完整的含水岩层，区内地貌有山前倾斜平原、冲洪积平原、沙漠区，灌溉水源主要是发源于天山等山区的额尔齐斯河、玛纳斯河、奎屯河、宁家河等河水和地下水，河道引水干渠位于河流的洪冲积平原、冲积扇中部、扇缘溢出带，渠基主要是河床冲积沙砾石，透水性较好，地基土质主要是低液限粉土和粉沙，地基土多具有含盐量较高，含水量较大的特点，根据室内土工实验结果和《水工建筑物抗冰冻设计规范》属于非冻

胀土、季节性冻土类型。灌区地下水埋深较浅，一般在 1.0 ~ 8.0m 之间，主要含水层为分布广、厚度大的粉土及粉细沙层。

3、渠系工程现状情况

(1) 总干渠

区内总干渠总长 347.4 km，断面形式多采用梯形断面和弧形渠底梯形边坡两种，防渗技术形式包括土料、浆砌石、混凝土塑膜双防渗、现浇混凝土和塑膜防渗等，土渠多修建于上世纪六、七十年代。防渗率平均 51.6%，各地防渗率变幅 33.3-50.2%，完好率 23-90.8%不等，部分渠道由于水流含沙量大，洪水期泥石流流入渠等原因，渠道衬砌磨损严重，再加上冻胀破坏等原因，部分渠道完好率较差，但采用将冻胀性土替换成非冻胀土，消除冻胀影响，并在渠道上设置退水建筑物后，渠道在入冬之前排空余水，不集水可减少渠道冻胀可能性，防渗渠道完好率可达 90%。

(2) 干渠

总长度 1713.89 km，防渗率平均 78.95%，各典型区变幅 64.26-100%，完好率 45.5-93.0%，断面形式为梯形或弧形底梯形断面。防渗方式是现浇混凝土板或预制混凝土板加防渗膜，防渗膜有一布一膜和纯塑料膜两种，渠基土为冻胀性土时则应增加戈壁垫层，可保证渠道正常运行。

(3) 支渠

总长度 2548.07 km，防渗率平均 75.77%，各地变幅 61-85.6%，完好率 70-95%，断面形式多为梯形。防渗方式是现浇混凝土板或预制混凝土板加防渗膜，膜下铺 25cm 左右戈壁垫层，该类渠道采取将冻胀性土替换成非冻胀土的防冻胀措施，完好率显著提高。

(4) 斗渠

总长度 6787.52 km，防渗率平均为 50.25%，各地变幅 46-52.18%，断面形式多为梯形弧形 U 形，防渗方式为预制混凝土板防渗、混凝土塑膜双防渗，完好度 95%。

（5）农渠

总长度 10053.02 km，8661.92，防渗长度 1326.73 km，防渗率 12.75-16%，平均 13.2%，采取混凝土塑膜双防渗，完好度 91%。

总体来说，总干渠、斗渠、农渠防渗率低，大多为土渠，渠道渗漏严重，输水速度慢，农业灌溉用水效率低，干渠、支渠虽然多为混凝土衬砌防渗渠道，但大部分为上世纪六七十年代修建的，由于河道泥砂含量大，洪水期泥石流流入渠造成渠道磨蚀严重，加上冻胀造成渠道毁坏严重，普遍存在混凝土板破损现象，渠道冻胀断面变形严重，渠系建筑物破旧，涵桥大多为简易涵桥，个别还为木桥，渠道闸门闸墙变形严重，闸门启闭不灵活，闸门止水效果差，年年维修，完好率低，影响渠道输水能力，因此，推广先进可行的防渗抗冻胀技术势在必行。

（三）渠道冻胀破坏的影响因素分析

据有关情况分析，混凝土渠道的冻胀破坏与它所处的环境密切相关，造成混凝土渠道冻胀破坏的环境因素有大气负温、渠床土壤性质、地下水埋深和渠道的运行方式等。

1、大气负温

大气负温是造成混凝土渠道冻胀破坏的最基本的环境因素，一方面大气负温使渠床土中的液态水变成了固态水，体积增长了 9%，另一方面大气负温又是土体中的液态水和汽态水向冻结锋面迁移的动力，在此动力的作用下，正温区土体中的水分不断地向冻结锋面迁移，在那里积累冻结，形成冰夹层和冰凸镜体。随着时间推移和

气温的进一步降低，冻结锋面也不断地向正温区推进，于是在冻结土层中就增加了大量的冰夹层和凸镜体，使冻结土体的体积膨胀率增加许多。一般说，大气负温越低，维持的时间越长，混凝土渠道的冻胀破坏就越严重。

2、渠床土质

混凝土渠道会不会产生冻胀破坏，冻胀破坏的程度如何？这和渠床土的性质密切相关。如果渠床土是非冻胀性的，混凝土衬砌板就不会被冻坏；如果渠床土是冻胀性的，混凝土衬砌板就可能遭受冻胀破坏。由于土是由固相（矿物颗粒），液相（水）和气相三部分组成，其中的液相（水）当温度降至 0°C 以下时由液相变为固相，体积增大 9%，使土体发生膨胀，因此土的冻胀性就与土的持水性密切相关。粘性土、壤土，因其颗粒细而持水性能好，毛细管的作用强，属冻胀性土。砂砾土、戈壁土，颗粒粗，持水性能很差，进入这种土层中的水分很快渗入深层，毛细管的作用非常弱，故这类土属于非冻胀性土。

3、地下水埋深

混凝土渠道的冻胀破坏除了大气负温和冻胀性渠床土这外，和地下水埋深条件也有很大关系。渠床土在冻结过程中，如果地下水位较高，地下水将通过毛细管向冻结锋面大量迁移，产生强烈的冻胀，使护砌板遭受严重的冻胀破坏。如果地下水位很低，不能通过毛细管向冻胀锋面迁移，只有极少量的液态水转变为汽态水向冻结锋面迁移，但因其速度慢，迁移量很有限，只能产生冻胀量很小的弱冻胀。综合以上两种情况，凡在土体冻结过程中有冻土层以外向冻结层补给水分的系统称开放系统，若冻结土层以外没有水分补给的系统称封闭系统。开放系统的冻胀量大，封闭系统的冻胀量小。

4、渠道运行方式

混凝土渠道的冻胀破坏与渠道的运行方式有很大关系。寒区渠道有一年四季都输水的和春夏秋季输水冬季不输水的两种运行方式,如引水式水库和引水式电站的引水渠都常年向水库和电站输水,而灌区内用于田间灌溉的渠道则冬季不输水。冬季输水的渠道,渠床土冻结仅发生在冬季渠道水位线以上,而冬季不输水的渠道则是全断面冻结,二者差异甚大,各有不同的冻胀破坏特征。

(四) 典型渠道防渗工程及抗冻胀技术措施

1、典型渠道防渗工程

(1) 柳西干渠防渗工程

柳西干渠防渗工程全长 8.2km, 设计流量 38 m³/s, 2002 年修建。断面形式为弧形底梯形, 底宽 4m, 渠深 2.5m, 边坡 1:1.75。防渗结构为现浇混凝土板和塑料薄膜组合防渗, 混凝土板厚 8~12cm, 下铺塑料薄膜, 膜下铺 20~40cm 戈壁垫层, 混凝土强度等级 C20, 抗冻等级 F200, 抗渗等级 W6, 水灰比不大于 0.45。渠道造价按当时价格计算每公里 210 万元。渠道建成至今已 7 年, 运行状况良好, 未发生冻胀破坏, 防渗效果明显, 渠道水利用系数达到 0.9。这种抗冻胀形式可运用于寒冷地区有充分施工时间的工程。

(2) 黄调奎渠防渗工程

黄调奎渠防渗工程全长 8.0km, 设计流量 20 m³/s, 2008 年修建。断面形式为梯形, 底宽 3m, 渠深 3.0m, 边坡 1:1.75。防渗结构为正六边形预制混凝土板和塑料薄膜组合防渗, 混凝土板厚 8cm, 下铺塑料薄膜, 膜下铺 50cm 风积沙垫层, 混凝土强度等级 C20, 抗冻等级 F200, 抗渗等级 W6, 水灰比不大于 0.45。渠道造价每公里 240 万元。渠道建成至今运行状况良好, 未发生冻胀破坏, 防渗

效果明显，渠道水利用系数达到 0.92。这种抗冻胀形式可运用于寒冷地区要求施工时间短的工程。

（3）莫索湾总干渠防渗工程

莫索湾总干渠防渗工程全长 20.6km，设计流量 12 ~ 22 m³/s，1991 年开工，1993 年完工。断面形式为弧形底梯形，圆弧半径 6.0m，底宽 5.2m，渠深 2.19 ~ 2.23m，边坡 1:1.75。当地最低气温 -42.8℃，负温天数 168 ~ 229 天，最大冻土深 1.6m。土质为壤土和粉沙土。地下水位 1.5 ~ 3.0m，工程实践表明，如不进行抗冻胀技术处理，冻胀破坏相当严重。

莫索湾总干渠防渗结构为现浇混凝土板和塑料薄膜组合防渗。混凝土板厚渠底 13cm，边坡 6 ~ 13cm，下铺 0.18mm 聚乙烯塑料薄膜，膜下铺 35 ~ 45cm 风积沙垫层。混凝土强度等级 C20，抗冻等级 F200，抗渗等级 W6，水灰比不大于 0.45。渠道建成至今已 16 年，运行状况良好，未发生冻胀破坏，防渗效果明显，渠道水利用系数达到 0.94。

（4）136 团 13 连斗渠改建工程

136 团 13 连斗渠工程全长 10.0km，设计流量 0.28 m³/s，加大流量 0.36 m³/s，由土渠改建为混凝土衬砌渠道。渠道断面形式 U 形，渠底为半圆形，圆弧半径 0.5m，渠深 0.85m，边坡接近垂直。当地 1 月份平均气温 -16.3℃，最大冻土深 1.4m。土质为沙壤土。地下水位平均 2.0m。

136 团 13 连斗渠工程防渗结构为预制 U 形混凝土板和塑料薄膜组合防渗。混凝土板厚 5cm，下铺 0.3mm 聚乙烯塑料薄膜，膜下不设垫层。混凝土强度等级 C20，抗冻等级 F200，抗渗等级 W6，水灰比不大于 0.45。渠道建成至今，运行状况良好，未发生冻胀破坏，防渗效果明显，渠道水利用系数达到 0.91。

（5）乔干渠防渗工程

乔干渠防渗工程全长 6.8km，设计流量 $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ，断面形式为弧形底梯形，圆弧半径 $0.8 \sim 0.9\text{m}$ ，弦长 $0.9 \sim 1.0\text{m}$ ，渠深 1.2m ，边坡 $1:1.5$ 。当地最低气温 -42.7°C ，最大冻土深 1.25m 。土质为低液限粉土及沙壤土。地下深大于 15m ，但由于渠道停水较晚渠基土冻结初期的含水量均大于 0.9 倍塑限含水量。根据渠道抗冻设计规范可判定为冻胀性土，应进行抗冻胀设计。

乔干渠防渗结构为现浇混凝土板和塑料薄膜组合防渗。混凝土板厚根据渠道流速确定。流速在 3m/s 以下采用 8cm 等厚板，流速 $3 \sim 4\text{m/s}$ 时采用 $8 \sim 10\text{cm}$ 变厚板（渠顶位置 8cm ，渠底位置 10cm ），流速 $4 \sim 5\text{m/s}$ 时采用 $8 \sim 12\text{cm}$ 变厚板。板下铺 0.3mm 聚乙烯塑料薄膜，膜下铺 30cm 砂砾石垫层。混凝土强度等级 C20，抗冻等级 F200，抗渗等级 W6，水灰比不大于 0.45 。渠深小于 1.2m 时不设纵缝，只设横缝，缝间距 2.5m ，缝宽 1.5cm ，缝中用聚氨酯灌缝。渠道建成至今已 2 年，运行状况良好，未发生冻胀破坏。

（6）乌什水水库输水干渠工程

乌什水水库输水干渠工程全长 14.5km ，断面形式为弧形底梯形，圆弧半径 $0.6 \sim 1.6\text{m}$ ，弦长 $0.6 \sim 1.6\text{m}$ ，渠深 $1.6 \sim 2.85\text{m}$ ，边坡 $1:1.75$ 。当地最低气温 -36.6°C ，负最大冻土深 1.25m 。土质为低液限粉土及沙壤土。

乌什水水库输水干渠防渗结构为现浇混凝土板和塑料薄膜组合防渗。混凝土板厚根据渠道流速确定。流速在 3m/s 以下采用 8cm 等厚板，流速 $3 \sim 4\text{m/s}$ 时采用 $8 \sim 10\text{cm}$ 变厚板（渠顶位置 8cm ，渠底位置 10cm ），流速 $4 \sim 5\text{m/s}$ 时采用 $8 \sim 12\text{cm}$ 变厚板。板下铺 0.3mm 聚乙烯塑料薄膜，膜下铺 30cm 砂砾石垫层。混凝土强度等级 C20，抗冻等级 F200，抗渗等级 W6，水灰比不大于 0.45 。渠道设 4 条纵

缝，分别设在圆弧末端和边坡板中间。横缝间距 3.5m，缝宽 1.5cm，缝中用聚氨酯灌缝。渠道 2002 年改建，至今已近 8 年，运行状况良好，未发生冻胀破坏。

（7）北屯灌区总干渠防渗工程

北屯灌区总干渠防渗工程全长 28.007km，工程分为 3 段：第一段 0+000 ~ 13 + 950 结构设计为均质土渠，为旧渠改、扩建段，设计流量 45 m³/s，第二段 13 + 950 ~ 16 + 580 结构设计为塑料薄膜防渗土渠，设计流量 25 m³/s，结构层共五层，由里到外，第一层为原状土渠床，第二层为沙垫层 40mm，主要是为了防止塑膜遇坚硬物破损，第三层为 0.3mm 厚黑色聚氯乙烯膜，第四层为沙过渡层，厚 40mm，第五层为土保护层。第三段 16 + 580 ~ 20 + 007 结构设计为塑料薄膜加现浇混凝土板组合防渗，设计流量 13 m³/s，此段渠道为新建。结构层共四层，由里到外，第一层为原状土渠床，第二层为沙垫层 40mm，主要是为了防止塑膜遇坚硬物破损，第三层为 0.3mm 厚黑色聚氯乙烯膜，第四层现浇混凝土板，板厚 80mm，混凝土强度等级 C20，抗冻等级 F200，抗渗等级 W6，渠道设横向伸缩缝，间距 3m，缝宽 20mm，在边坡中间和边坡与渠底交界处设纵缝，缝宽 20mm。

北屯灌区地处欧亚大陆腹地，冬季寒冷而漫长，一月份平均气温 -18℃，工程建于 2001 年，总投资 1257.18 万元，断面形式为弧形底梯形。工程地点标准冻土深 1.6m，地质条件为：渠道大部分渠段为砂砾石覆盖物，为非冻胀性土，部分渠段中有泥岩出露，泥岩属低液限粘质土，是冻胀性土。因此，应对不同土质的渠段采取不同的防渗和抗冻措施。该渠道冬季不运行。

2、典型渠道防冻胀措施

总结归纳典型地区渠道防渗抗冻工程设计、施工和管理等情况，其防冻胀措施主要如下：

(1) 在设计时尽量采用填方渠道，这样可使渠基充分排水，防止地下水产生的冻胀对渠基的影响。渠道的边坡不宜过陡，应考虑渠基自身的稳定和施工的要求。根据农七师、农九师典型渠道情况，边坡不宜陡于 1:1.75 或 1:1.5。混凝土的强度、抗渗、抗冻和水灰比要满足要求，防渗结构采取混凝土板和防渗膜组合结构能有效的防渗和抗冲。渠道断面采用梯形、弧形底梯形断面，弧底在法向冻胀力的作用下内力主要为压应力，能充分发挥混凝土抗压强度大的特点，是比较合理的结构形式。

(2) 混凝土板下的垫层起到反滤、排水、保温和缓冲作用，条件许可时采用戈壁垫层，如果戈壁运距远，造价高时也可采用风积沙作为垫层材料，这种做法在黄调奎渠中取得了较好的效果。风积沙分布很广，属于非冻胀土，根据农八师的实验资料，当风积沙垫层厚度为 30~85cm 时，渠道基土最大冻胀量均小于 7mm。因此，换填一定深度的风积沙能够有效的防止渠道的冻胀破坏，并可降低造价，莫索湾总干渠防渗运用效果明显。

另外，根据规范推荐的公式计算出的垫层厚度较大，造价较高，可当地天然碎石材料丰富，所以可采用 30cm 碎石作为垫层，如农九师根据当地运行良好的已建渠道的经验，取 30cm 厚度，也满足了抗冻要求，所以，在确定垫层厚度时应综合分析论证，以达到经济和安全的目的。

(3) 雷诺护垫（镀锌双绞合低碳钢丝网格雷诺护垫）的应用，能够很好地解决了北方地区冬季渠系渠底鼓包、冻胀、变形问题，便于季节性施工，无需维修。该技术措施已在农十师北屯灌区三千

渠防渗防冻胀中得到成功应用。

(4) 施工时要保证施工质量, 填方渠道土方质量是防渗工程的基础, 也是防冻害的主要环节之一, 渠基土要充分压实并泡水, 垫层要铺均匀, 混凝土要震捣密实, 填缝材料要饱满。

(5) 在运行管理上冬季上冻前应将渠道中的水排干, 冬季保持渠道干燥, 这样可以减少冻胀对渠道的损害。

(6) 在渠旁两侧设 8~10m 林带, 可起生物排水作用, 对降低地下水位、防治渠道冻害十分有利。

(7) 当渠道沿线大部分为非冻胀性土渠基时, 根据分析计算, 并参考已建工程的经验, 采用梯形断面渠道(如北屯灌区总干渠), 不设戈壁垫层, 这样既降低了造价, 工程运行后也不发生冻胀破坏。

(8) 由于渠道较长, 地质情况会发生很大变化, 渠道的防渗抗冻措施也应根据地质条件的变化而改变。对于非冻胀土地基, 可简化抗冻措施以降低造价, 在坡度较缓流速较低的渠段甚至可以不用混凝土板衬砌。

(9) 暗管排水消除冻胀破坏。在地下水位较高的渠段, 遇到渠道边坡和渠底大量渗水的情况, 导致铺设塑膜后, 渗水因塑膜阻碍而无导渗出路, 这时塑膜和混凝土板将受到较大的渗透压力, 导致边板和底板被顶起, 成为废板。这样不仅使工期延误, 也无法保证施工质量。针对此问题解决的方法是: 先在该渠段的渠侧底部铺设一条顶部稍高于底板的沙砾石排水棱体, 将各渗水点连通起来, 再沿渠道每隔一定距离在排水棱体中水平插入一根长约 1m, 钻有梅花孔的排水钢管, 将渗水引入渠道, 然后再铺设塑模、浇筑混凝土板。通过这种措施, 渗水通过沙砾石棱体集中从排水管中流出, 快速的降低了地下水位, 减少了地下水产生的扬压力。这种方法不仅解决了现浇混凝土板的施工问题, 在渠道运行过程中, 秋季停水后

也可将渠堤中的地下水引入渠内，使渠堤保持干燥，减轻地下水对渠道的冻胀破坏。这种情况适用于挖方渠道，且地下水位较高的渠段。

（10）间隔梁的应用。冻胀破坏是灌区渠道的主要病害，如果渠道局部发生了冻胀破坏，没有及时修复，在水流的冲击下破坏范围将迅速扩大，渠道流速越大这种现象越明显。农十师建管局在总结以往经验的基础上提出了根据渠道纵坡不同，每隔 10m 或 20m 设置一条间隔梁，把渠道人为地分割成多个小单元，增加了渠道的抗冲性能，从而起到了控制渠道破坏蔓延的作用。这种方法既可应用于现浇混凝土衬砌渠道，也可应用于预制混凝土衬砌渠道。间隔梁的应用，大大降低了混凝土渠道的冻胀维修成本。

（五）渠道防渗防冻胀技术要点

总结兵团开展渠道防渗防冻胀技术应用实践活动，从设计、施工和管理等方面，主要有一下技术要点。

1、渠道设计

根据渠道冻胀的机理分析可知，低温、地下水位和渠基土质是影响渠道冻胀的三要素。新疆地处欧亚大陆腹地，冬季气温低，持续时间长，这个因素一般无法改变，只能从其它两个因素着手，寻求减少冻胀的途径，并通过合理的断面设计来抵抗冻胀破坏。

（1）在渠道规划和选线时尽量采用填方渠道，这样可使渠基充分排水，防止地下水对渠基冻胀的影响，根据调研和实际查看的结果，填方渠道发生冻胀破坏的现象很少。由于渠道线路很长，沿线的地质条件会有很大的变化，应充分做好沿线的地质勘察工作，根据不同的地质情况，采取相应的抗冻措施。

（2）干渠和支渠等流量较大的渠道横断面宜采用弧底梯形断

面，即渠底为圆弧段，边坡为 1:1.75 左右的斜坡段。由于弧底在法向冻胀力的作用下内力主要为压应力，能充分发挥混凝土抗压强度大的特点。这样的断面对向上的冻胀力有较强的抵抗力，可避免平底板中间断裂的现象，是比较合理的结构形式。斗渠和农渠可采用梯形和 U 形断面。

(3) 防渗结构采取混凝土板和防渗膜组合结构能有效的防渗和抗冲，混凝土板厚根据渠道大小确定，防渗膜可以用素膜或附布的复合膜，厚度 0.3mm 左右。

(4) 渠道的边坡不宜过陡，应考虑渠基自身的稳定和施工的要求，边坡过陡一是边坡不稳定，在春季渠基土融化时渠坡容易滑坡；二是在施工时质量不好保证，比如垫层的铺设比较困难，上部的砂石料容易下滑，造成上薄下厚的情况，根据调查情况一般不要陡于 1:1.75，特殊情况也不要陡于 1:1.5。

(5) 混凝土的强度、抗渗、抗冻和水灰比要满足要求。虽然靠提高混凝土的强度来抵抗冻胀破坏是不经济的，但春季化雪时会出现白天化晚上冻的情况，混凝土板将受到多次冻融循环的作用，如果混凝土的耐久性不够，混凝土板将很快破坏，使渠道的抗冻性和抗冲性能降低。因此，对混凝土的强度应作一定的要求，根据调研来看，采用混凝土强度等级 C20，抗冻等级 F200，抗渗等级 W6，水灰比不大于 0.45 是合适的。

(6) 混凝土板下的垫层起到反滤、排水、保温和缓冲作用，条件许可时采用戈壁垫层，根据调研的情况厚度一般为 30cm ~ 40cm。按照渠道抗冻设计规范计算出的换填厚度往往很大，不经济也没有必要，应结合当地的实际情况合理的确定戈壁垫层的厚度，如果戈壁运距远，造价高时也可采用风积沙作为垫层材料。风积沙在新疆分布很广，属于非冻胀土，风积沙垫层厚度为 30 ~ 85cm 时，渠道

基土最大冻胀量均小于 7mm，因此，换填一定深度的风积沙能够有效的防止渠道的冻胀破坏，并可降低造价。

(7) 在渠旁两侧布置林带，可起生物排水作用，对降低地下水位、防治渠道冻害十分有利。

2、渠道施工

(1) 要保证施工质量，渠基土要充分压实，垫层要铺均匀，塑料薄膜的接缝要牢固可靠，混凝土要震捣密实，填缝材料要饱满。

(2) 地下水位较高的挖方渠段，可采用铺设排水管的方式进行排水。

(3) 流速较大的渠道可根据渠道纵坡不同，每隔 10m 或 20m 设置一条间隔梁（隔墙），增加渠道的抗冲性能，把渠道分割成多个小单元，把渠道的破坏控制在两道隔墙之间，从而起到了控制渠道破坏蔓延的作用，这种方法即可应用于现浇混凝土衬砌渠道也可应用于预制混凝土衬砌渠道。间隔梁的应用，可大大降低混凝土渠道的冻胀维修成本。

3、运行管理

(1) 完善渠道运行管理制度，做好渠道日常养护、安全检查和维修工作，及时清除渠道中杂草、蚁穴、鼠洞等阻碍物，建立经常检查、定期检查和特别检查的检查制度，按照经常养护、随时维修、养重于修、修重于抢的原则，使渠道得到及时维修，保证使用。

(2) 冬季不运行的渠道，上冻前应将渠道中的水排干，冬季保持渠道干燥，这样可以减少冻胀对渠道的损害，对产生冻胀破坏的渠段要及时维修，以免破坏现象蔓延。

(3) 对于冬季运行的水库引水渠和电站引水渠，由于水下部分渠基不冻结而水面以上的渠基冻结，一般会造成水面附近混凝土板

的裂缝，这种裂缝不完全是由于渠基冻胀造成的，也有可能是由于冰盖压力造成的，要解决这个问题有 2 个途径，一个是冬季使渠道尽量满渠运行，使渠道形成冰盖，冰盖以下渠道不冻结，但这种方法可能难以控制；另一种方法是使渠道满渠运行并设法使渠道中不结冰，这样也可防止渠道冻胀，如采用沿渠线打井抽取水温较高的地下水注入渠道提高水温的方法使渠道的水温高于 0°C ，从而防止了渠道冻胀，也解决了冰凌影响引水发电的难题。该方法适用于地下水丰富地区，并且要耗费一定的电能。

三、 内蒙古河套灌区渠道防渗防冻胀技术应用

（一）河套灌区概况

1、灌区地理位置

黄河内蒙古河套灌区位于内蒙古自治区西部、黄河上中游内蒙古段的北岸冲积平原，地理坐标为北纬 $40^{\circ} 19'$ ~ $41^{\circ} 18'$ ，东经 $106^{\circ} 20'$ ~ $109^{\circ} 19'$ ，西与乌兰布和沙漠相接，东至包头市郊区，南至黄河，北抵阴山山脉的狼山及乌拉山，灌区横跨巴彦淖尔市的 7 个旗县区，东西长 200 余 km，南北宽 40 ~ 60km，灌区总土地面积 1679.31 万亩，现灌溉面积 861.54 万亩，是我国最大的一首制自流引黄灌溉区和全国三个特大型灌区之一。

2、水文、气象及水资源条件

（1）水文条件

（1）黄河

河套灌区南缘为黄河，是河套灌区主要灌溉水源，经三盛公水利枢纽调节控制后，由与黄河并行的总干渠向灌区供水。据磴口水

文站实测年径流资料统计,多年平均径流量 259.6 亿 m^3 ,黄河多年平均悬移质输沙量为 0.890 亿 t,多年平均含沙量为 $3.46\text{kg}/\text{m}^3$ 。黄河巴彦淖尔市段属黄河上游地区,地处黄河流域最北端,全长 340 km,西起磴口二十里柳子,东至乌拉特前旗池家圪堵,占内蒙古黄河干流总长的 47%。国家重要设施包兰铁路、拉丹高速公路、110 国道、京兰国防通讯线路、京呼银兰光缆通讯、输变电路及输水大动脉总干渠均紧贴黄河大堤,形成七线并行之势。据黄管局资料,黄河水封冻日期一般在 12 月 10 日至 25 日,解冻日期一般在翌年 3 月 10 日至 20 日,封冻期为 90~110 天左右。每年 3 月 20 日左右黄河出现凌汛,4 月中旬凌汛结束,4 月底至 5 月初正是灌区头水灌溉期。黄河水质优良,矿化度在 $0.5\text{g}/\text{L}$ 左右。

(2) 乌梁素海

乌梁素海位于巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,地处黄河河套灌区东端,地势最低,北侧与狼山洪积扇相接,东侧与乌拉山洪积阶地相连,是黄河流域最大的淡水湖和自治区第二大淡水湖泊。在我国湿地、荒漠及动物物种三大生态系统保护中均具有十分重要的地位。乌梁素海南北长约 40km,东西宽 5~10km,海水位控制高程 1018.5~1019.0 m。水面面积约 45 万亩,最大水深 2.5m 左右,小于 0.7m 的水面占总水面面积的 85%,湖水较浅,蓄水量约 3 亿 m^3 。乌梁素海是有径流条件的湖泊,湖水的补给源主要是河套灌区的灌、排水及山洪水,据统计灌排渠系年入湖水量占湖水总补给量的 86%。此外还有大气降水、山洪水及地下径流的补给。从水文测验资料分析,湖水总体流向为由北至南。根据多年统计资料,河套灌区排入乌梁素海水量(1987~1997 年)年均 6.18 亿 m^3 ,包括降水及山洪水量,乌梁素海从西山咀排入黄河水量 2.42 亿 m^3 ,湖水年均蒸发量 3.11 亿 m^3 。

(2) 气象

河套灌区地处大陆性干旱、半干旱气候带，具有显著大陆性气候特征。冬季严寒少雪，夏季高温干热，降雨量少，蒸发量大，干燥多风、日温差大、日照时间长，无霜期短，土壤封冻期长，属于无灌溉即无农业地区。灌区年降水量 139~222mm，年蒸发量 1999~2346mm，年平均气温 6~8℃，自东向西升高，平均相对湿度 40~50%。年封冻期 5~6 个月，最大冻结深度 1.0~1.3m。封冻期由 11 月中下旬至翌年 4 月，无霜期 135~150 天，全年日照期 3100~3300 小时。

(1) 降水

降水量在年内变化较大，分配极不均衡。灌区多年平均降水量 163.8mm，降水区域分布有明显的东西分带性，自东向西递减，由于受季风的影响，夏秋两季（6~11 月）降水量占全年降水量的 85% 以上，春季降水量占 10~20%。

(2) 蒸发

灌区多年平均蒸发量在 2194.5mm，蒸发量是降水量的 10~16 倍，并自东向西递增。年内蒸发量变化较大，以春末夏初蒸发量最大，冬季蒸发量较小。

(3) 气温及土壤冻结

灌区年均气温 6~8℃，月平均最高气温在 7 月份、最低在 1 月份，初霜日在 9 月下旬，终霜日在 4 月上中旬，平均无霜期 135~150 天。土壤封冻期长达 180 天，封冻期在 11 月下旬至下年 4 月，土壤冻结厚度在 1.0~1.3m 左右，土壤完全解冻融通在第二年 5 月中旬，即在小麦灌头水时才能融通。

(4) 风

灌区风多、风力强，全年以西风和西北风为主，每年春冬两季

为本区风季，冬季风力强，春季持续时间长，多年最大月平均风速 19.6m/s，全年风沙日 47~105 天，强烈的春季季风是造成灌区蒸发的主要原因之一。

（3）水资源条件

河套灌区的水资源主要是过境的黄河水。黄河水量丰富，年均过境径流量约 296.9 亿 m³，水质优良，为 HC03-Ca 型，矿化度<1g/L 的优质淡水。自从 1961 年在黄河上建成三盛公拦河闸和总干渠引水枢纽工程以后，灌区相继建成了总干渠、干渠、分干渠、支渠、斗渠、农渠、毛渠等七级输配水灌溉系统和相应的排水系统。

河套灌区的地下水主要依靠引黄水的入渗补给，其次为大气降水入渗和北部狼山、乌拉山的侧向径流补给。受传统用水方式的影响，河套灌区地下水的开发利用，在过去仅限于城镇生活用水、农村人畜饮水和工业用水，近些年在乌兰布和灌域、乌北灌域、三湖河灌域等地小面积的发展了一些井灌。

3、水文地质与工程地质条件

（1）灌区地质概况

（1）地层

河套灌区第四系地层广泛分布，厚度大于 1000 m，由于地质构造、古地理环境和地貌条件的控制，第四纪沉积物在不同地貌单元及不同地质时期，其成因、岩相和岩性，具有不同的特征。

（2）地质构造

河套平原在地质构造上属于华北地台（一级）鄂尔多斯台向斜（二级）的一部分，为一形成于中生代侏罗纪晚期的断陷盆地（三级）。

（3）地震

河套灌区属华北地震区，阴山～燕山地震亚区，河套断陷地震活动带。该区新构造运动表现十分强烈，地震活动的特点是频度高、强度低。根据《中国地震动参数区划图》GB18306--2001，陕坝～磴口一带地震动峰值加速度为 0.20 g，相应地震基本烈度为Ⅷ度；其它地区地震动峰值加速度为 0.15 g，相应地震基本烈度为Ⅶ度。

（2）区域水文地质条件

河套灌区地处干旱气候带，地质构造上为长期下沉的封闭断陷盆地，在漫长的地质时期中，一直为湖水所占据，这种自然条件控制着地下水的形成和分布，因此使河套灌区具有明显的干旱气候带沉降盆地型水文地质特征。

（1）含水层分布规律

河套灌区含水层的分布主要受以湖相为主的古地理环境和黄河泛滥改道冲积的影响。由于不同地质时期的古气候、古地理环境、沉积相和新构造运动的控制，使含水层在水平方向上及不同深度的分布形态、发育程度以及水文地质特征有所差异。区内含水层是多层叠置，几何形态复杂，多种成因类型的含水地质体。其中第四系上更新统含水层厚度最大，分布最广，供水意义较大。其次第四系中更新统含水层厚度也较大，在山前和隆起区分布较广，埋藏较浅，有一定的供水意义。

（2）地下水补给、径流、排泄条件

地下水的补给、径流主要受气候、地貌、水文地质条件和人为活动的控制河套平原是一个地处干旱气候带的引黄灌区，地形平缓，含水层颗粒细，降水稀少，蒸发强烈，引黄量大。这些因素对地下水的形成和运动有深刻的影响。

①地下水的补给条件。在地下水的形成条件上，具有区域性的主要补给因素是引黄的入渗补给，其次为降水入渗补给。除蒸发蒸

腾外，大量引黄水入渗补给浅层地下水，形成地下水的主要补给来源。

②地下水的径流条件。河套平原地形平缓，含水层颗粒细，水力坡度小，地下水径流条件较差，地下水主要靠垂向入渗补给，以垂直蒸发消耗。因此地下水的运动以垂直交替为主要特征。

③地下水的排泄条件。河套平原在地形及地质构造上均为一个封闭的盆地，地下水无水平排泄出路。区域地下水流向自西南向北东和自西向东，地下水排向扇前洼地和乌梁素海，构成地表水和地下水的局部排泄带。在天然状态下，区内无统一排泄带，唯一的排泄途径是蒸发消耗，因而使河套灌区具有以垂直交替为主的地下水运动规律。

近年来，随着河套灌区排水系统的建设，对排泄地下水发挥了重要作用。区内目前地下水开采水平较低，仅限于解决人、畜用水和部分工业用水。在总排干沟以北、三湖河和一干灌域，近年发展了部分井灌，地下水开采量在逐年增加。

(3)地下水动态特征

灌区地下水动态受气象因素和引黄灌溉的影响，表现出明显的季节性周期动态变化。根据多年动态观测资料，全灌区枯水期水位埋深在 2.03 ~ 2.64 m，丰水期水位埋深在 0.93 ~ 1.20 m，多年平均水位埋深在 1.65 ~ 1.71 m，多年平均水位变幅在 1.01 ~ 1.49 m。

(4)地下水化学条件

河套平原的地质构造及水文地质条件，决定了灌区咸水分布较广，加之后期的改造作用，使区内地下水水质分布变的更为复杂。

①咸淡水分布规律。咸淡水在水平方向上往往有渐变和突变两种形式，一般以渐变为主，自咸水带向淡水带，矿化度降低，水化学类型也有相应变化。高矿化盐卤水向淡水由于递变迅速，过渡带

很窄，常以突变形式过渡。

②地下水化学的基本特征。由于地下水的溶滤作用、混合作用、浓缩作用以及与周围介质的离子交换等多种水化学作用，随着径流条件变差，地下水矿化度逐渐增高，水化学类型由低矿化的 HCO_3 型渐变为高矿化的 $\text{CL}\cdot\text{SO}_4$ 或 CL 型水，表现了盐份分带以堆积为主，尤以灌区下游表现明显，干旱气候带沉降盆地的典型离子 CL 和 Na 富集，而以 $\text{CL}\text{-Na}$ 型或其淡化型水广泛分布。

（3）工程地质条件

河套灌区上部地层为第四系全新统，根据岩性特征可分为上下两组，上部岩性以砂壤土、壤土和粘土为主，下部岩性为粉砂、细砂，局部为中砂，具典型的上细下粗二元结构。

4、社会经济状况

河套灌区是巴彦淖尔市经济社会发展的核心区域，共涉及 9 个旗县区和 19 个国营农牧场，其中巴彦淖尔市有 7 个旗县区，即磴口县、杭锦后旗、临河区、五原县、乌拉特前旗、乌拉特中旗、乌拉特后旗。共有 108 个乡镇、农场、站，另外，还包括伊克昭盟的 1 个乡，阿拉善盟的 1 个农场。灌区内现有总人口 177.023 万人，其中：农业人口 117.53 万人。按农业人口计，人均灌溉面积 7.3 亩。

河套灌区是国家及内蒙古自治区重要的商品粮基地之一，是巴彦淖尔市农业经济的支柱，农业生产以农作物种植业为主。种植业中以粮食为主，经济作物占有重要地位。粮食主要有小麦、玉米、糜黍、豆类等，经济作物以葵花、番茄、甜菜为主，另外还有黑瓜籽、瓜果、枸杞、啤酒花等。由于气温影响，农作物种植一作有余，二作不足，复种指数很小，套种比例较大为 32%。河套灌区种植业比较发达，农副产品丰富，具有发展畜牧业的优势。河套灌区的灌

溉农业是巴彦淖尔市国民经济赖以发展的基础，随着农业的发展，交通、电力、机械、食品加工等行业得到相应发展。包兰铁路、京～藏高速公路及 110 国道横贯河套平原，市内公路遍及城乡，四通八达，形成了以临河区为中心向各旗县和乡镇辐射的交通网络。灌区东部乌拉特前旗有装机 20 万 KW 的火力发电厂，是呼包电网的组成部分，已并入西北电网。灌区内电网纵横，乡镇都已通电。随着灌区农业生产的不断发展壮大，农业生产条件有了明显改善。现在灌区的工业、农业、交通、通讯、城市建设等方面都有较大的发展，临河区是巴彦淖尔市行政公署所在地，也是全市政治、经济、文化、交通的中心。

5、灌区渠道防渗工程现状

通过实施大型灌区续建配套与节水改造项目建设，截至 2009 年，已累计完成杨家河、义和、永济、长济、东风分干渠等 19 条支渠以上骨干渠道防渗衬砌长度约 145km。

（二）河套灌区衬砌工程采取防冻胀措施的必要性

（1）地区特点决定了灌区渠道衬砌工程必须采取防冻胀设计

（1）气候特点

河套灌区地理位置为北纬 $40^{\circ}12'$ ～ $41^{\circ}20'$ ，东经 $106^{\circ}10'$ ～ $109^{\circ}30'$ 之间，属季节性冻土区。据当地气象资料，河套灌区多年平均气温 7.0°C ，冻结指数（负积温）在 $600\sim 1100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ，土壤冻结期一般从 11 月中旬开始，至翌年 4 月下旬融通，冻结深度 $80\sim 140\text{cm}$ 左右。形成了渠道基土产生冻胀的气候条件。

（2）土质特点

据内蒙古水文地质大队勘探资料，河套灌区 2.5m 深包气带范围内以重粉质壤土和重粉质砂壤土为主，粉粘粒（粒径 $< 0.05\text{mm}$ ）

含量都在 65%以上，属于强冻胀性土质。

(3)地下水的特征

灌溉引水量直接影响地下水位的涨落，影响了土壤含水率高低。每年 9 月下旬至 11 月上旬的秋浇是河套灌区必要的一次储墒灌水，此时灌区地下水位最高（埋深最浅），灌区地下水平均埋深在 50 ~ 100cm 左右，因此造成灌区土壤含水率较高，土层 20cm 以下的土壤含水率都在 25%左右，超过了土壤起始冻胀含水率。在冻结过程中，地下水位与冻结锋面几乎同步下降，从下层土壤向冻结锋面的水分迁移非常明显，为土壤产生强冻胀提供了水分条件。

上述河套灌区区域性的特点，同时具备了使土壤产生冻胀的温度、土质、水分条件，冻胀敏感性的土壤在水热耦合共同作用下形成了强冻胀区域。

(2)试验研究证实了河套灌区渠道衬砌工程必须采取防冻胀设计

为了揭示河套灌区区域性冻胀规律，探讨灌区适宜的渠道衬砌结构形式，自 1987 年起，河套灌区管理总局及内蒙古水利科学研究院等单位对灌区冻胀规律、各级渠道适宜的渠道衬砌结构形式及防冻胀措施进行了长期系统的试验观测和研究工作。

①在 1991 ~ 1994 年完成了“河套灌区季节冻土区域冻胀规律及其冻胀分类研究”，其中对不同地下水埋深条件下地表冻胀量进行了测试：当地下水埋深在 0 ~ 50cm 时，地表冻胀量达到了 15 ~ 17cm。

②在 1999 ~ 2001 年完成了“内蒙古河套灌区节水改造工程综合节水技术试验与示范研究”，在 2002 ~ 2004 年完成了内蒙古河套灌区节水改造综合技术试验监测与示范推广”项目，分别在杨家河干渠、永刚分干渠、西济支渠的衬砌段落建立了冻胀观测试验场，重点研究了不同级别、不同走向的衬砌渠道采取保温防冻胀的方案。

试验进行了三个冻融周期的观测，其中未采取保温措施的试验段主要观测成果如下：

杨家河干渠为南北走向，渠道阴、阳坡不明显，但渠道不均匀冻胀强烈，阴坡最大冻胀量为 25.9cm，阳坡最大冻胀量为 10.2cm，封顶板最大冻胀量为 11.9cm。

永刚分干渠为东西走向，渠道阴、阳坡明显。在三个冻融周期的观测中，渠底最大冻胀量达到 21.9cm，阴坡最大冻胀量为 13cm，阳坡最大冻胀量为 4.6cm，阴坡齿墙最大冻胀量为 11cm，阳坡齿墙最大冻胀量为 4.2cm。

西济支渠为南北走向，渠道阴、阳坡不明显。在三个冻融周期的观测中，渠底最大冻胀量达到 16.4cm，阴坡最大冻胀量为 8.9cm，阳坡最大冻胀量为 8.6cm。

由以上观测成果可见，未采取保温措施处理的衬砌渠道都发生了很大的冻胀变形，而且在渠道基土消融后，都不能完全复位，甚至存在较大的残余变形。这些试验段经过几个冻融周期冻胀和融沉交替，产生了边坡塌陷、滑坡等现象。然而，在采取了不同厚度保温措施处理后的试验段落，平均每厘米厚保温板（密度为 20kg/m³），可提高基土温度 0.7~1.8℃，减少冻深 5~11cm。渠道冻胀量得到大幅度的削减或已完全消除，衬砌渠道未受冻胀破坏。由试验数据建议：在河套灌区，东西走向的衬砌渠道上阴坡保温板的厚度不宜小于 10cm，阳坡保温板的厚度不宜小于 5cm。在南北走向的衬砌渠道上阴、阳坡不明显，保温板的厚度宜在 8cm 左右。

大量研究成果及近年实施的节水改造工程（有保温措施）表明：在河套灌区衬砌渠道中采用聚苯乙烯保温板防止渠道冻胀是非常必要的，效果非常明显，与换填风积砂等其他防冻胀措施相比，效益费用比最合理。

（三）河套灌区节水改造工程渠道防渗防冻胀措施应用情况

1、河套灌区渠道防渗结构形式

灌区渠道衬砌段采用全断面聚乙烯膜防渗，全断面混凝土预制板做保护层。这种结构形式防渗效果好，渠道输水糙率较小，施工简单。

渠道衬砌防渗层采用全断面铺设 0.3mm 厚聚乙烯膜料，膜上采用 40 cm × 60 cm × 6 cm 或 50 cm × 70 cm × 8cm 长方形混凝土预制板和弧形底混凝土预制板做保护层，混凝土预制板的强度等级为 C25，抗冻等级不小于 F200；混凝土预制板与膜料之间设 3cm 厚 M10 砂浆过渡层，混凝土预制板铺砌的砌筑缝宽为 2.5cm，用 M15 水泥砂浆勾缝。

封顶板采用与坡面顶层预制为整体的 C25 混凝土预制构件，并且将膜料从封顶板向外延伸 0.3m，封顶板外侧设路缘。

2、河套灌区渠道防冻胀结构形式

灌区节水改造工程骨干渠道选用聚苯乙烯保温板作为保温材料，它具有自重轻，强度高，吸水性能低，隔热性能好，运输、施工方便且削减冻深和冻胀效果好等优点。根据灌区渠道防渗衬砌工程抗冻胀试验观测，采用聚苯乙烯保温板防冻保温，能够满足渠道衬砌工程的抗冻胀要求。保温板厚度阴坡为 8~10cm，阳坡为 6~8cm。

田间渠道采用换填风积砂的保温措施，风积砂换填厚度 20~30cm。

3、河套灌区渠道防渗防冻胀技术措施应用

(1) 聚苯乙烯保温板在衬砌渠道防冻胀中的应用

(1)渠道的基本情况

永刚分干渠为东西走向的宽浅式梯形断面渠道，全长 35km，入口设计流量为 20m³/s，1999 年随着永刚分干渠建筑物续建配套与节水改造示范工程的实施，在永刚分干渠二闸上完成渠道衬砌 8.8km，2000 年农业综合开发骨干工程项目又在永刚分干二闸以下完成了 4.0km 的混凝土渠道衬砌。

西济支渠为南北走向的梯形断面和梯形断面弧形坡脚渠道，全长为 9.45km，引水口设计流量为 5.74m³/s，控制灌溉面积 2887hm²。西济支渠灌域共有斗渠 7 条，总长度为 20.63km，斗渠多为东西走向，设计流量在 0.72 ~ 1.81m³/s 之间。1999 年随着隆胜节水示范区的建设，西济支渠及其灌域内的斗农渠全部进行了渠道衬砌。

(2)聚苯乙烯板材料性能和保温机理

①聚苯乙烯板材性能

聚苯乙烯（EPS）是由聚苯乙烯聚合物为原料加入发泡添加剂聚合而成，属超轻型土工合成材料。它是无色、无嗅、无味而且有光泽的透明固体。具有重量轻、导热系数低、吸水率很小、化学稳定性强、抗老化能力高、耐久性好、自立性好、施工中易于搬动等优点，缺点是耐热性低。

(2)聚苯乙烯板保温机理

一般渠道，基土冻结并能产生冻胀需具备的基本因素为：基土具有冻胀敏感性、基土有相应的冻结环境、基土中含有一定的孔隙水，并且三者缺一不可。因此只要控制其中任意一个因素便可实现削减或消除土体冻胀的目的。衬砌渠道采用聚苯乙烯保温措施，就是利用保温材料导热系数低的性能改变和控制渠道衬砌基土周围热

量的输入、输出及转化过程，人为地影响冻土结构，使冻土内部的水热耦合作用在时间和空间上向不利于冻胀的方向发展变化。具体表现在：提高冻结区的地温；推延冻结的进程，减缓冻结速率以削减冻深；减少水分迁移量，降低冻土中的冰含量；削减冻胀量。

(3) 聚苯乙烯保温板在衬砌渠道防冻胀中的应用

内蒙古自治区自 1999 年开展大型灌区节水改造工程建设以来，已完成一大批骨干渠道衬砌和渠系建筑物配套工程建设，提高了灌溉水的利用效率和效益、渠道输水能力和灌区行水安全，取得了显著的经济效益、社会效益和生态效益。针对内蒙古大型灌区属于季节性冻土地区，渠道冻胀破坏严重的实际，近 10 年来已在八个大型灌区的 415km 骨干渠道上推广使用聚苯乙烯保温板 35 万 m³，大大提高了渠道的使用寿命，达到了“防渗、抗冻、经济、可行”的目的。

(4) 聚苯乙烯保温板应用效果评价

① 聚苯乙烯保温板提高基土地温显著，这是由于保温板保温隔热的作用，可有效减缓基土与外界的热交换速度，使基土在冻结过程中温度速率降低缓解，板愈厚表现愈明显。适宜的板厚与渠道走向、坡面、上下部位有关。在试验条件下，东西走向渠道阴坡上部铺设 5cm，下部铺设 8cm 厚保温板时，基土不出现负温；阳坡上、下部均铺设 3cm 厚保温板可基本消除负温。南北走向渠道由于阴、阳坡及上、下部位温差小，均铺设 4cm 厚保温板可消除负温。保温板保温能力受环境影响较大，即同一厚度保温板在不同部位其保温效果不同，保温板每厘米厚提高基土温度在阴坡上、下部分别为 1.8℃、1.3℃；在阳坡为 0.7℃。

② 保温板可明显减小基土冻深，这是由于保温板导热系数低，能有效缓解冻结速率，抑制冻深发展。随着板厚增加，冻深呈线性

规律减少。在试验条件下，每厘米厚保温板对冻深减少值与渠道走向和部位有关，东西走向渠道阴坡上、下部分别为 11.3cm、6.8cm；阳坡上、下部分别为 11.7cm、5.0cm。南北走向渠道阴坡上、下部分别为 10.4cm、9.5cm；阳坡上、下部分别为 9.5cm、6.9cm。不同厚度保温板冻深削减率和渠道走向部位有关。东西走向渠道削减率阴坡上部 4cm 厚板、下部 5cm 厚板分别为 44.0%、48.7%；阳坡上部 3cm 厚板、下部 5cm 厚板分别为 68.3%、56.7%。南北走向渠道削减率阴坡上部 4cm 厚板，下部 5cm 厚板分别为 43.7%、66.7%；阳坡上、下部均为 3cm 厚板分别为 39.0%、50.7%。

③保温板能够抑制基土水分变化，这是由于铺设保温板后，冻结锋面推进变缓，基土温度梯度较小，水分迁移及原驻水重分布的能力较弱，使冻结过程中冻结锋面与地下水的距离逐渐加大，水分迁移路径相对增大，不利于水分迁移，而有利于减少冻胀。

④保温板对基土冻胀有明显的抑制作用，能减小冻胀量。对冻胀削减量和渠道走向、部位有关。东西走向渠道阴坡上部铺设 3cm、4cm、5cm 厚保温板可削减冻胀量 52%、97%、100%；阴坡中部铺设 5cm、8cm、10cm 保温板可削减冻胀量 39%、72%、82%；阳坡上下均铺设 3cm 厚保温板可基本消除冻胀量。南北走向渠道阴、阳坡上部铺设 4cm、下部铺设 5cm 厚保温板可基本消除冻胀量；渠底铺设 5cm 厚保温板可削减冻胀量 88%；渠底铺设 8cm 厚保温板可完全消除冻胀量。

据试验结论：东面走向渠道阴坡上部铺设 3cm、4cm、5cm 厚保温板可削减冻胀量 52%、97%、100%；阴坡中部铺设 5cm、8cm、10cm 保温板可削减冻胀量 39%、72%、82%。阳坡上下均铺设 3cm 厚保温板可基本消除冻胀量。南北走向渠道阴、阳坡上部铺设 4cm、下部铺设 5cm 厚保温板可基本消除冻胀量，渠底铺设 5cm 厚保温板

可削减冻胀量 92.5%；渠底铺设 8cm 厚保温板可完全消除冻胀量。

（2）换填风积砂在衬砌渠道防冻胀中的应用

（1）风积砂特性

利用不冻胀性土换填冻胀性基土，是防冻胀普遍采用的一种有效措施，换填料一般采用粗砂、砾石等。为了能取得更多的料源，河套灌区试用了在内蒙古分布较广的风积砂，进行了室内、模拟渠道和现场应用三种试验，均比较理想。风积砂属于岩石风化产物，受风力搬运、堆积而成。其特点是颗粒均匀，粉粘粒含量极微，渗透性能好，对防止冻胀是较为有利的。

（2）换填设计处理

共设计了 8 种换填处理，分别在试验场模拟渠道及马架梁渠道上进行试验。模拟渠道按超过最大冻深以内更换基土，更换基土下部设 40cm 厚砂砾石层，以保证地下水连通。模拟渠道与原基土之间及不同处理之间皆用塑料薄膜隔开，以分别控制不同地下水位。回填基土按干密度 1.40g/cm^3 控制。马架梁渠道基土保持原状态。试验段总长度为 59m。8 种处理分别在 4 种地下水位（离渠底高低为 40、60、140、-80cm），2 种基土（轻粉质壤土与粉质粘土）条件下进行，换填型式分为全断面等厚度换填与不等厚度换填两种。

（3）换填风积砂效果评价

①风积砂属弱冻胀性土壤，是一种较好的防冻材料。实测换填层内冻胀率在 3% 以下，防冻效果在 90% 以上。可用于基土最大冻胀量为 260mm 地区，使冻胀量控制在 30mm 左右，冻胀率在 3% 以下，防冻效果在 90% 以上。

②在冻结过程中风积砂垫层中饱和水份向与冻结面相反方向转移，故换填层内含水量大小对冻胀的影响甚微。地下水埋深不宜小于 60cm。

③风积砂的防冻效果随换填厚度的增加而增加，换填率为 70% 左右时，效果好、造价低，再增加厚度，效果增加不大。

④风积砂颗粒组成中大于 0.1mm 颗粒愈多其冻胀性愈小，因砂土开敞冻胀性随粉粒含量增大而增加，因而应尽量减少粉粒含量，但从实测结果看，当粉粒含量为 6% 时，仍无大的影响，因而不宜大于此数。

⑤渠道两坡宜采取不等厚换填（上部小、下部大），当地下水位及土质条件不同时，其不同部位换填率可分别按以下取值：

1. 地下水位埋深在渠底以下 40 ~ 60cm，土质为壤土、轻、中粉质壤土时，阳坡上、下部位换填率可采用 45% ~ 70%，阴坡可采用 50% ~ 80%，渠底采用 80%。

2. 地下水位埋深在渠底以上 50 ~ 100cm，两坡有出逸水，土质为粉质粘土、粘土、重粉质壤土时，阳坡上、下部位换填率取 80% ~ 100%，阴坡采用 75% ~ 90%，渠底采用 100%。

当地下水位、水质条件与上述不同时，可根据当地条件，对上述取值进行修改，一般均可取得较好的防冻效果。

4、几点体会

(1) 据调查了解，聚苯乙烯保温板在水中长期使用过程中，可能存在导温系数增大、保温能力降低的不利因素。因此，如果条件许可，也可在灌区渠道衬砌工程中选用聚氨脂保温板，一是材料使用寿命延长，二是材料保温性能好。

(2) 据有关资料，聚苯乙烯保温板厚度达到 10cm 以上后，需对防渗衬砌渠道进行抗浮稳定计算。

(3) 支、斗渠级渠道，如冻胀量较小，宜采用灌区常采用的弧形渠底衬砌结构。换填风积砂可考虑只换填渠道两侧 20 ~ 30cm，渠道

底部可不考虑换填。

(4) 对不同走向、位置、水文地质条件的渠道要有针对性的设计保温板厚度及铺设方法。

(5) 对地下渠道进行保温设计时,应考虑地下水的测渗压力和浮托力对渠道边坡保温板的作用, 以免保温板和砼预制板被浮起, 破坏边坡稳定性。