

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.01.021

# 严寒地区大型倒虹吸工程管道应力及水力安全控制

邓铭江<sup>1</sup>, 李红伟<sup>2</sup>, 杨长征<sup>1</sup>, 李新<sup>1</sup>, 路强<sup>2</sup>

(1. 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 新疆北疆供水工程跨越吉拉沟大洼槽的三个泉倒虹吸, 跨度 11 km, 内径 2.8 m, 工作水头 160 m, 是国内外同类工程中综合难度较高的大型倒虹吸工程, 在结构强度、材料工艺、安装敷设、工程质量方面都有极高的要求, 特别是高水头管道运行、充水、放空、水锤防护等各种工况下的水力安全控制问题, 高温差与严寒条件下管道的应力应变问题尤为突出。对该工程设计、科研、施工及运行管理方面的经验进行介绍, 对其在新技术、新材料、新工艺等方面取得的理论研究和技术创新成果进行总结, 研究认为: 工程总体布置合理, 工程运行后监测资料及工程安全评价表明各项性状指标良好, 通过模型试验研究确定的闸门开度、关闭速率、充水排气、放空排水等水力安全控制关键技术科学合理, 为严寒地区大型倒虹吸工程的技术发展提供借鉴。

**关键词:** 严寒地区; 大型倒虹吸; PCCP 管道; 水力安全; 应力; 安全控制

中图分类号: TV672+.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)01-0113-08

## Pipe Stress and Hydraulic Safety Control of Large-scale Inverted Siphon in Cold Region

DENG Mingjiang<sup>1</sup>, LI Hongwei<sup>2</sup>, YANG Changzheng<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, LU Qiang<sup>2</sup>

(1. Xinjiang Irtysh River Basin Authority of Engineering Development & Construction, Urumqi, Xinjiang 830000, China;

2. Xinjiang Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

**Abstract:** In order to cross grant gully in Jilagou, Sangequan inverted siphon was developed which is a large-scale project in the north of Xinjiang with comprehensive higher difficulties comparing with similar projects all over the world, which has 11 kilometer span, 2.8 meters inner-diameter and 160 meters working head. It highlights extreme requirement in the field of structure strength, materials process, installment, layout, and engineering quality, especially hydraulic safety control issues under working conditions like operation in higher working head, water filling, water discharging, protection of water hammer, and stress strain issues under higher temperature difference and cold weather. This paper introduces its experience of design, scientific research, construction, operation and management, concludes achievement of theoretic research and technical innovation in new techniques, material and process. It concludes that its lay-out is overall reasonable, operation monitoring data and indices of engineering safety appraisal are good, key hydraulic safety control techniques are scientific and rational including gate opening, closure velocity, water filling and exhaust, water discharging for empty etc. were determined by model tests. It can provide reference for technical development of large-scale inverted siphon in cold region.

**Keywords:** cold region; large-scale inverted siphon; prestressed concrete cylinder pipe(PCCP); hydraulic safety; stress; safety control

新疆北疆供水工程穿越准噶尔盆地、古尔班通古特沙漠,线路全长 512 km。其中三个泉倒虹吸跨越沙漠北缘的吉拉沟大洼槽,沟宽 11 km,沟深 160 m,两端高差 28.6 m。地层系第三系砂岩、泥岩和风积沙。倒虹吸全长 10.93 km,其中管线长 10.57 km,设置两根管道,两端与引水明渠连接,最大静水压力 1.6 MPa。考虑到钢管的造价较高,为节省工程投资,管道采用 PCCP(Prestressed Concrete Cylinder Pipe,

PCCP)与钢管的组合方案,即 1.4 MPa 以下采用 PC-CP 管,管线长 7.39 km,内径 2.8 m;1.4 MPa 以上采用钢管,管线长 3.18 km,内径 2.7 m。

工程于 2005 年建成通水,安全运行 11 a。根据供水需求的不断增长,2015 年开始实施扩建工程,在原预留进出口位置,再增设一条相同的管线,形成三根管道并行的工程布置格局,设计过水能力  $3 \times 19 \text{ m}^3/\text{s}$ (见图 1)。

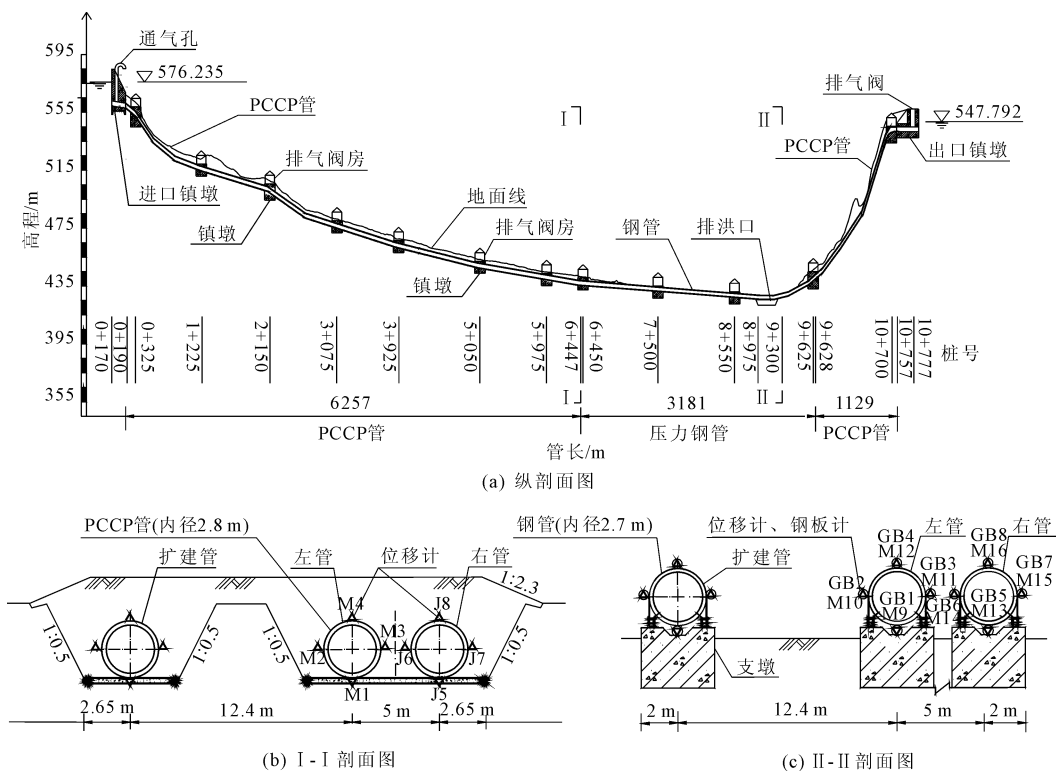


图 1 三个泉倒虹吸管道纵横剖面图

## 1 工程特点及存在问题

### 1.1 工程特点

(1) 综合难度大。按综合难度系数,三个泉倒虹吸是迄今为止亚洲最大的倒虹吸工程<sup>[1]</sup>。超长、高应力、大变形等工程特性,对倒虹吸管道的制作、安装、埋设、运行管理提出了极高的要求,特别是管道伸缩节必须具有满足轴向伸缩位移,又要满足一定的挠曲度和偏位量。

(2) 流量变幅大。渠道输水流量为  $5 \text{ m}^3/\text{s} \sim 57 \text{ m}^3/\text{s}$ ,但每年恢复输水前,需采用小流量( $1 \text{ m}^3/\text{s}$ )缓慢充水。水头高、流量变幅大、进出口水位落差大等水力学特性,对管道充水、运行、放空等各阶段的水力安全控制技术要求高、难度大,特别需解决好高水头下的消能放空和水锤防护问题<sup>[2]</sup>。

(3) 环境气候条件恶劣。工程区地处北纬  $45^\circ$

以上的严寒地区,冬季最低气温  $-41.7^\circ\text{C}$ ,夏季最高温度  $40.6^\circ\text{C}$ ,昼夜温差  $20^\circ\text{C}$  左右,年际温差高达  $82^\circ\text{C}$ 。昼夜温差、阴阳面温差和年际温差大、干湿交替频繁、冻融循环剧烈等不良气候特征,对管道的应力应变调控提出了极高的要求。特别是管基地质条件较差,大多为第三系的膨胀泥岩和风积沙,对管道的变形适应能力也提出了极高的要求。

### 1.2 需解决的关键技术问题

(1) 管道水力学及水力安全控制问题。三个泉倒虹吸水力条件复杂,技术难度大,管道水力学及水力安全控制问题尤为突出。一是流量变幅大、管线长、进出口水位落差大,为避免管道进气,引起管压波动,需对进出口结构体形和水流条件进行系统研究,严格控制;二是为了保证进口最小淹没水深,需建立出口闸门联合调控机制;三是出口闸门关闭过快,会产生水锤压力,需研究保护措施;四是入冬前

管道实施放空时,存在底部放空流速控制及消能问题。

(2) PCCP 管道质量及施工工艺控制。上世纪末,大直径 PCCP 管道在国内的应用才刚刚起步,设计理论和生产控制标准尚不完善,国家也未颁行相关的设计标准和规程规范<sup>[2]</sup>,仅有行业标准。当时主要参照美国供水协会(AWWA)《预应力钢筒混凝土压力管制造标准》<sup>[3]</sup>(ANSI/AWWA C301 - 2007)、《预应力钢筒混凝土管设计规范》<sup>[4]</sup>(ANSI/AWWA C304 - 2007),结合本工程的特点,考虑国内管道设计生产水平,研究并改进生产工艺,制订了更为严格的质量和施工控制标准,并在管道施工安装前,做了 100 m 现场试验段,现场检测管道的内压强度、转角接头的密封性能、管基和管道的回填压实指标等,并实施包括管道设计、制造、运输、安装、防腐、埋设、接头密封及线路打压试验等全过程控制。2015 年在扩建第三根管道时,应用国内相关规程规范<sup>[5-8]</sup>,对全过程控制方案进行了全面的复核,证明了控制标准的合理性和运行安全的可靠性。

(3) 钢管道工程多向变位问题。倒虹吸钢管段

处在管线压力最高处,管线跨越第三系砂岩泥岩及风积沙两种地层,地质条件不均一,地基条件相对较差。工程处在沙漠边缘,白天温度较高,且阴阳面温差相对较大,管道在纵向也会发生旁弯变形,因此,要求伸缩节既满足轴向伸缩位移,又要满足一定的挠曲度和偏位量。

### 1.3 国内外已建大型倒虹吸工程简介

倒虹吸是一种应用广泛的水利工程型式。近几十年来,我国相继建设了一批“百千米级”的大型倒虹吸工程(见表 1),随着经济社会发展对水资源的需求和区域水资源优化配置的需要,一批跨流域调水工程陆续兴建,如掌鸠河引水、引黄入晋等工程,倒虹吸逐步向高水头、长距离和大管径发展。从材料结构看,早期的倒虹吸工程多用混凝土和预应力钢筋混凝土材料,随着材料技术的发展,钢管、PCCP 管、玻璃钢管等新型管材逐渐运用于大管径的输水工程,特别是 PCCP 和玻璃钢管,其造价比钢管低,工厂化成批生产,安装方便,目前已在大型倒虹吸工程和城市供水工程中得到普遍应用<sup>[9-14]</sup>。

表 1 我国已建主要倒虹吸工程统计表

倒虹吸工程名称	所在省份	建成年份	最高水头/m	管长/m	设计流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	管 材	管道内径/m
南沙河渠道	河北	2013	87.1	2305	$3 \times 77.00$	预应力混凝土	$6.600 \times 6.500$
掌鸠河引水工程岔河	云南	2006	402.0	1855	6.90	钢管	2.200
掌鸠河引水工程大婆树	云南	2006	315.0	3527	6.90	钢管	2.200
俄垵水库他龙	云南	2006	653.5	11032	$0.39 \sim 1.77$	钢管	$0.600 \sim 0.900$
勐糯	云南	2003	486.0	4126	1.60	钢管	0.764
引黄入晋 1#	山西	2002	150.0	7425	9.90	PCCP	2.200
引黄入晋 2#	山西	2002	150.0	3853	7.30	PCCP	$2.000 \sim 2.200$

倒虹吸工程在国外引调水工程中应用的更早、更普遍。如:以色列的北水南调工程<sup>[15]</sup>,建成于 1964 年,经过两条倒虹吸,跨度分别为 150 m 和 50 m,管道直径为 2.2 m ~ 2.8 m;埃及西水东调工程,建成于 1997 年,将尼罗河水引向西奈半岛,工程穿越苏伊士运河,修建了长 750 m,最高压力 40 m,流量  $160 m^3/s$ ,管径 5.1 m 的大型倒虹吸工程<sup>[16]</sup>;美国科罗拉多引水工程,建成于 1974 年,工程穿越沙漠和山地达 390 km,其中倒虹吸 144 座,总长 47 km<sup>[17]</sup>。

三个泉倒虹吸在充分论证管道材料性价比和工程安全性基础上,根据压力等级、温度气候和工程地质条件等因素,采用 PCCP 和钢管组合方案,在国内大型输水工程中仅此一例。我国已建的倒虹吸工程

大部分工程布置和制约条件相对简单,基本采用小流量变幅以适应水力控制要求。三个泉倒虹吸由于其大流量、大管径、高水头、长距离的工程特性,特别是输水流量和水头损失变幅很大,进出口的型式选择和水力控制是工程安全运行的关键。

## 2 严寒地区大型倒虹吸工程关键技术

### 2.1 复杂运行条件下水力安全控制

针对高水头、大跨度、大管径、输水流量变幅大等条件下的倒虹吸水力控制难点,通过理论分析、数值模拟和水工模型试验,对水力控制做了系统研究,确定采用深式进水口和控制出口闸门开度进行水流控制相结合的工程布置模式,提出了控制出口闸门水锤压力的工程措施。解决了复杂运行条件下水力

控制难题,并制定了充水、运行、放空各阶段的控制指标及操作规程<sup>[18-19]</sup>。

### 2.1.1 进出口段体型及运行工况设计

进出口建筑物对倒虹吸安全运行起着重要的控制作用,水力设计较复杂。若进口发生吸气漩涡或由于水位波动及其它原因引起倒虹吸管道进气,将直接引起倒虹吸管道水流不稳定性,严重时甚至危机工程安全。

(1) 运行工况设计。由于倒虹吸输水流量(5 m<sup>3</sup>/s ~ 35 m<sup>3</sup>/s)变化范围较大,输水线路较长为 11 km,水头损失就相差 24 m。如何保证在各种输水流量情况下,进水口前水流流态平稳,满足最小淹没水深的要求,避免管道进气引起明满流交替及压力波动等危害,优化设计并合理确定运行工况尤为重要。通过模型试验和大量的数值分析,并考虑运行管理

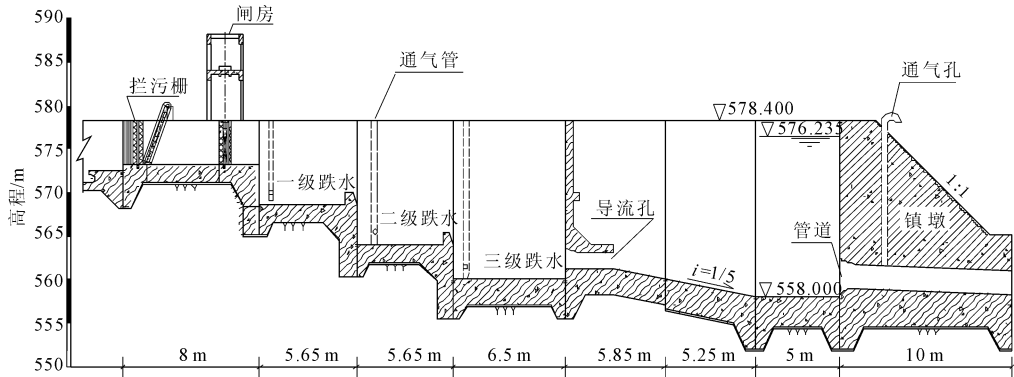


图 2 三个泉倒虹吸进口段纵剖面图

(3) 出口段水力设计。由于倒虹吸输水流量变幅较大,运行条件为,输送加大设计流量、设计流量时出口闸门全开,其它流量均需控制出口闸门的开度,以保证进口水位保持在最小淹没水位以上。三个泉倒虹吸出口单孔闸门尺寸 2.5 m × 2.5 m,局开开度在各种输水流量下范围为 0.12 m ~ 1.12 m,开度越小,孔口出流的平均流速越大,最大为 14.71 m/s,因此,必须经消能后低流速进入输水明渠,以防对下游渠道的冲刷。经计算及模型试验,出口设置长 30 m 的消力池,消力池末端流速在各种运行工况下流速最大为 1.7 m/s,使水流与沙漠渠道平顺连接<sup>[20]</sup>。另外,为了充水排气,出口消力池尾坎高程高出管道出口 20 cm 左右。

### 2.1.2 进口流量与出口闸门开度联合调控

根据倒虹吸运行条件,在输送小于设计流量时,需控制出口工作闸门开度,保证进水口水位在最小淹没水深及最高水位之间,这就要求严格控制出口闸门开度。根据水力学计算、模型试验和实际运行

安全方便等要求,确定运行工况为:管道设计流量和加大设计流量时出口闸门全开,小于设计流量时通过调节出口闸门开度控制进口水位。

(2) 进口体型研究。由于进口前池的水位变幅较大,为 12.46 m,为防止水动能冲击和有害流态发生,在上游渠道与前池之间设置三级跌水消能工,高度分别为 4.50 m、4.50 m、4.12 m,并在第三级跌水下游设置导流孔,孔高 1.7 m,控制最大流速 ≤ 2.06 m/s,呈缓流流态(见图 2)。模型试验验证<sup>[20]</sup>,设置三级跌水和导流孔,具有显著的消能消波功能,有效地解决了前池水位变幅较大的问题,且保证了水流入管流态平缓稳定,可将上游来流平稳地过渡到倒虹吸正常运行所需的前池水位,同时,可将少量卷入水中的气泡经跌水至下游底板后反弹出水面,较涡曲面连接或其它型式的水面衔接,更为安全可靠。

情况,不同引水流量对应的闸门运行情况及闸门开度值的建议值见表 2<sup>[21]</sup>。

表 2 引水流量与闸门开度及运行工况表

运行方式	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	开度/m
单管运行	5.0	0.12 ~ 0.22
	10.0	0.27 ~ 0.40
	15.0	0.45 ~ 0.78
	17.5	0.53 ~ 1.12
双管运行	20.0	0.27 ~ 0.37
	25.0	0.34 ~ 0.39
	30.5	0.50 ~ 0.85
	35.0	0.53 ~ 1.11
	40.0	0.37 ~ 0.59
三管运行	45.0	0.45 ~ 0.70
	50.0	0.55 ~ 0.85
	57.0	2.50

### 2.1.3 水锤安全防护

由于倒虹吸进出口落差较大,在出口闸门全开、

三管同时运行、通过加大流量时,管道设计流速 3.2 m/s,如果出口闸门关闭速率过快,管道内将产生很大的水锤压力。因此,必须严格控制闸门关闭速率,把水锤压力波动值控制在一定的安全范围内。为了不提高按工压确定的 PCCP 管道压力等级,管道水锤压力宜控制在 0.28 MPa 以下,以节省工程投资。

根据水力数值分析,闸门在全开至完全关闭的过程中,水锤压力与关闭速率成正比。研究发现,在小流量状态时,即单管流量由 5 m<sup>3</sup>/s 至完全关闭时,产生的水锤压力最大,是 PCCP 管道的设计控制工况(图 3),实际应用中,最终采用出口闸门线性关闭速率  $\leq 0.118$  m/min,最大水击压力控制在 0.2 MPa<sup>[18,21]</sup>。

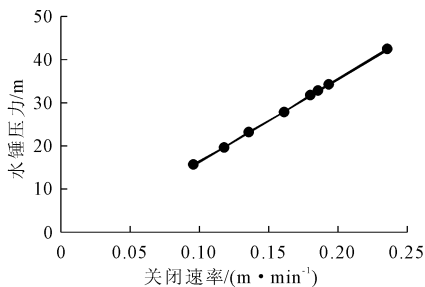


图 3 水锤压力与关闭速率关系曲线

#### 2.1.4 充水与底部放空水力安全控制

管道充水流量不得大于排气阀的进气量,即 1 m<sup>3</sup>/s,控制流速 2.0 m/s ~ 5.6 m/s,防止对管壁及承插口接缝处造成冲蚀破坏,单管充水时间为 19.32 h。管道放空建筑物设在倒虹吸最低处,最大的技术难点是 160 m 水头,管口流速高达 27 m/s,常规阀门难以保证在长期承受高压高速水流条件下正常工作。通过水工模型实验,研究采用锥形减压阀与消能井联合的消能放空布置型式,使其流速降到 1 m/s ~ 2 m/s。消能井内径为 4 m,净高 8.8 m,井内冲砂排水管末端口朝下,距离底板 1.5 m,井上部设溢流口与排水明渠相接<sup>[22]</sup>。

#### 2.2 不良地质环境条件下 PCCP 管道质量安全控制

(1) 管基变形控制。三个泉倒虹吸通过的泥岩、砂质泥岩地层属中、强膨胀岩,而冲洪积细砂层经原位载荷试验,承载力较低为 80 kPa ~ 100 kPa。为了防止管基变形,主要采取了以下措施:

基土换填。对泥岩、砂质泥岩地层段进行 50 cm 的砂砾料换填处理,对冲洪积细砂层段进行 80 cm 的换填,要求相对密度  $D \geq 0.75$ ,以提高管基的承载力,保障管基不产生泥岩膨胀及砂基沉陷破坏。

管沟排水。在管沟底部设纵横排水,将地下水顺坡排出管沟外,避免管基软化、泥化。

(2) 管道安装和回填压实控制。为有效控制工程质量,在现场布置了 100 m 的试验段,对回填料、压实参数、施工工艺等开展了系列研究,制定了《三个泉倒虹吸 PCCP 管道工程安装质量控制指标及检测要求》<sup>[23]</sup>,对管道垫层压实、管道安装、管道回填、管道水压试验等进行全过程严格控制。

管道安装完成后进行回填,管基砂砾料垫层以上至管道轴线采用砂砾料回填,压实相对密度  $D_r \geq 0.7 \sim 0.75$ ,  $d_{\max} \leq 6$  cm;为了保护管道外部涂层在施工中不被破坏,沿管壁布设 5 cm 的细砂保护层;管道轴线至管顶以上采用冲洪积砂回填,管顶 30 cm 以下  $D_r \geq 0.7$ ,以上  $D_r \geq 0.65$ ;整个回填面表层压设 50 cm 黏土和 10 cm 的砂砾料,防止雨水渗入和表层风蚀。

(3) 管道防腐处理。在桩号 5 + 550—7 + 070 段,地下水  $\text{SO}_4^{2-}$  含量 5 947 mg/l,  $\text{Cl}^-$  含量 6 724 mg/l,而且沿线砂岩土体中的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  含量普遍较高,对混凝土及钢结构均存在中强腐蚀性。主要采取以下工程处理措施:一是排水,在管基砂砾石垫层底部及沟槽两侧铺设厚度 0.6 mm PE 复合土工膜(两布一膜),并在管沟底部两侧膜上各设置一条直径 160 mm 的 UPVC 滤水管,外包无纺布,将膜上管基内的水顺坡引入管道最低处排出。既防止地下水对管道产生腐蚀破坏,又防止管道渗水及雨雪水渗入管基,引起泥岩膨胀和砂基沉陷。二是隔离,管道外层砂浆保护层采用高抗硫酸盐水泥,并在管道外涂 600  $\mu\text{m}$  ~ 1 000  $\mu\text{m}$  环氧煤沥青防腐,在管沟底及沟槽两侧铺设防渗土工膜,以隔离有腐蚀性的地下水和岩体,管沟回填料采用无腐蚀的冲洪积砂。

(4) 管道生产工艺及施工质量控制。三个泉倒虹吸 PCCP 管道综合难度系数高,为寻求大口径、高水头、大型倒虹吸 PCCP 管道技术的新突破,本工程对原材料性能、管体结构、生产工艺、质量控制、施工工艺等开展了深入研究,加强监测、量化控制每一个工序质量,确保工程质量安全,节省了大量的工程投资<sup>[24]</sup>。

管道生产工艺及质量控制。首先对管道生产的主要原材料,即:普通硅酸盐水泥、高抗硫酸盐水泥、砂石料、高效减水剂、预应力钢丝、薄钢板、承插口板料、环氧煤沥青防腐涂料等,进行严格的试验检测;二是对管道生产工艺和主要流程,即:对承插口成型、钢筒组焊、钢筒静水压力试验、胚管成型养护、径

向预应力缠绕、保护层喷浆、防腐层涂装等,制定严格的质量控制标准;三是对管道生产关键环节,即:内压试验、承插口接头转角试验、成管贯通性裂缝控制等,明确严格的质量要求。

管道安装施工及质量控制。由于管道自身重量大,在松软且坡度较陡的沙土层中进行管道安装,施工难度较大。施工中除对管基换填 50 cm ~ 80 cm 砂砾料外,还分别采取以下施工措施:一是管道铺设中,每 100 m 设一处卸管平台,以保证吊装设备正常起吊和管道入槽,为防止安装设备沿坡下滑,采用单管龙门吊并加装制动装置,并在制高点设置牵引装置,采用由低向高顺序安装,保证施工安全和龙门吊沿轨道滑动自如;二是严格控制管道轴线位置和高程,提高管道包角 180°以下砂石料回填压实度,根据现场载荷试验预留 1.5 cm 沉降量,管道回填完成后轴线和高程偏差均  $< \pm 3$  cm,满足规范<sup>[23]</sup>要求;三是由于地形起伏较大,为保障管道稳定,在管道转角、进人孔、排气阀及沿线每隔 300 m ~ 500 m 设置 1 个镇墩,共布置了 3 × 18 个镇墩;四是为适应松软地层导致的接头沉降变化,在管道接头处设置限位块,承、插口对接时的环向间隙控制在 2 cm ~ 3.5 cm,每一个接头都要进行打压试验和注浆勾缝处理;五是

注水浸泡开展 100 m、1 km、6 km 三级水压检验,试验结果均满足规范<sup>[23]</sup>要求。

### 2.3 不良气候环境条件下钢管质量安全控制

(1) 软基变形控制。倒虹吸 3 根压力钢管,采用露天明管平行布置,长 3 181 m,处于管线压力最高处。管线跨越砂岩泥岩及沙漠风积沙两种地层,地基承载力相对较差。水平向无拐点,纵向设 5 个拐点,钢管设计压力等级为 1.7 MPa,管壁厚度 2.6 cm。为了有效控制软基变位造成的安全影响,除在纵向拐点位置外,沿管线每 100 m 再设置一个镇墩,共 3 × 32 个镇墩。支墩间距砂岩、泥岩段为 8 m,风积沙段为 6 m,共 3 × 381 个支墩。共布置进人孔 23 个、排气阀 3 × 4 个、底部冲砂放空孔 3 × 2 个。

(2) 温度变形控制。工程处于古尔班通古特沙漠边缘,为了适应不良的地质和气候条件,在每个支墩上均采用滚动式支座,滚轮直径 40 cm,宽度 20 cm;在钢管 3 根管线上共布置了 3 × 31 个伸缩节,右侧两根管道采用双法兰套筒的伸缩节型式和能够适应较大变位的 C 型胶圈止水。设计工作压力 1.7 MPa。通过试验研究和改进设计,完全可满足伸缩量  $s < 15$  cm,角变位  $\alpha \leq 5^\circ$ ,径向变位  $\Delta \leq 5$  cm 的变形控制要求(见图 4)。

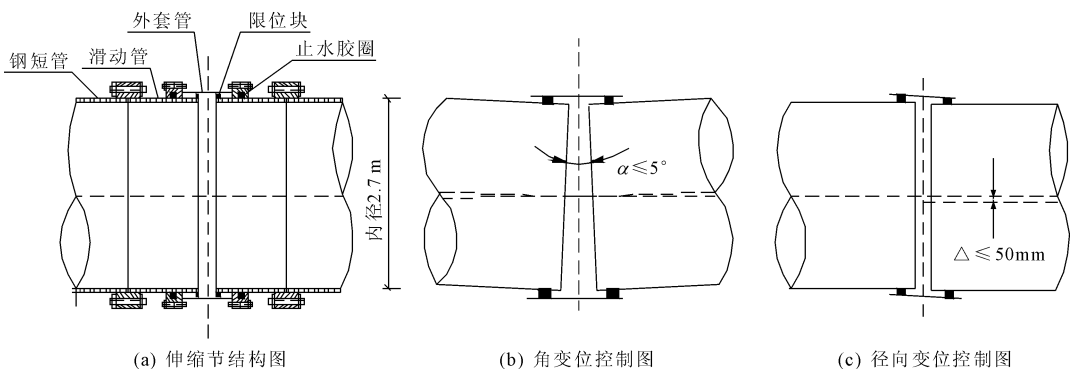


图 4 钢管伸缩节结构和变位控制图

由于年温差和日温差较大,钢管除考虑轴线方向的自由伸缩外,还应考虑水平方向由于太阳照射方向变化,钢管两侧由温差而产生的扭曲变位。设计时采用了吊挂式滚轮支承结构,当发生管轴线旁弯或镇、支墩不均匀沉陷时,滚轮可以自由运动,滚轮悬空时,可在下支座上加设垫板调整滚轮支撑平衡<sup>[25]</sup>。

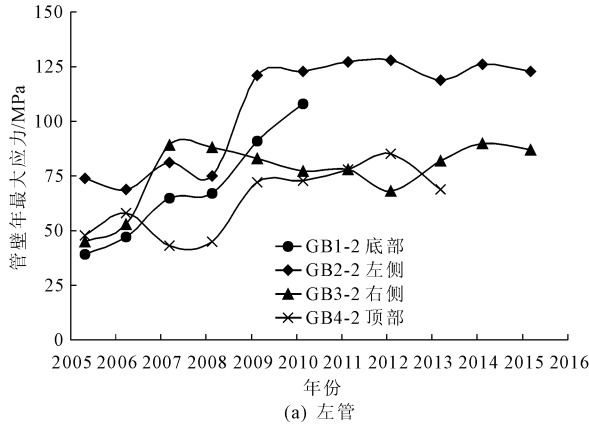
## 3 管道应力与变形安全监测

(1) 管道环向最大拉应力。在钢管段 9 + 300 断面左右管道各布置 4 个钢板计,监测最大环向应

力(图 1(c))。从图 5 实测应力变化曲线可看出,管道在运行初期年最大环向应力变化和增幅较大,随后很快趋于稳定,其中右管比左管应力趋稳要快,可能与左管靠近施工道路、受干扰较大有关;受温差影响,管道底部和左侧管壁温度高于顶部和右侧,因此环向应力也相对较高;实测管道最大环向应力 128 MPa,钢材屈服强度  $\sigma_s = 235$  MPa,钢管设计允许应力 129.25 MPa(0.55 $\sigma_s$ ),小于设计允许值。

(2) 管道伸缩节变形监测。在钢管段 9 + 300 断面左右管道伸缩节布置位移计,监测最大位移变形。从图 6 实测最大变形曲线可以看出,伸缩节变

形运行初期变形较大,随后很快趋于稳定;伸缩节变形主要受温度影响,在冬季最低气温期间年变形最大,在夏季最高气温期间年变形最小,通水后管道温度较稳定,伸缩节变形也最稳定;同一伸缩节上下两侧变形差值较小,右侧变形量大于左侧,伸缩节向左



偏转,实测最大角变位  $4.8^\circ$ , 小于设计允许值  $\alpha \leq 5^\circ$ ; 历年最大变形量左管为 91 mm, 右管为 137 mm, 至 2016 年伸缩节累计最大变形量 89 mm, 年最大变幅约为最大变形量的 50% 左右, 管道设计允许变形量 150 mm, 实测最大变形量均小于设计允许值。

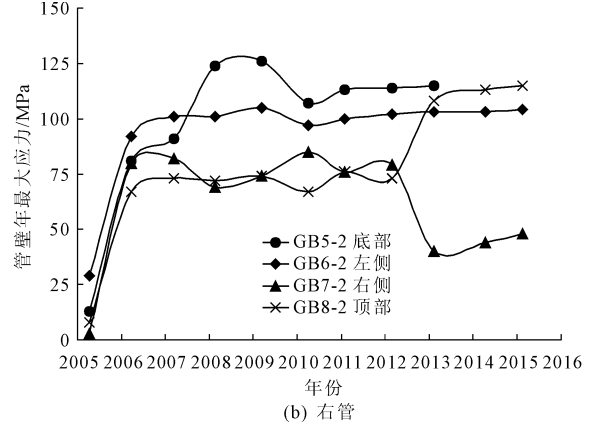


图5 9+300断面左、右管道最大环向应力变化曲线

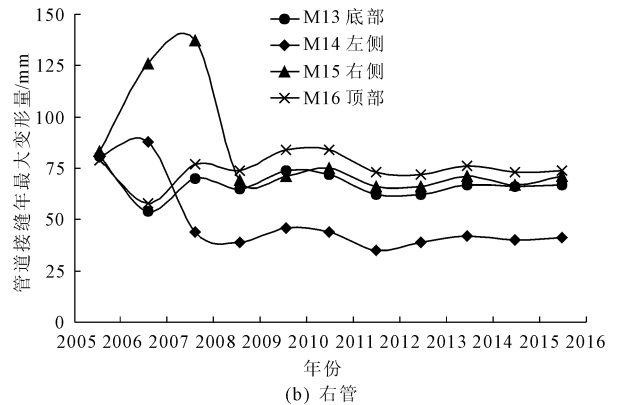
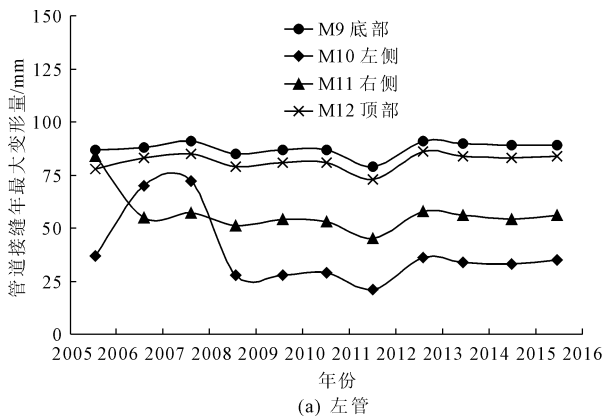


图6 9+300断面左、右管道伸缩节年最大变形量曲线

(3) PCCP 与钢管连接部位变形监测。6+447 断面伸缩节两端分别连接 PCCP 与钢管, 实测伸缩节年最大变形量左管为 3.9 mm, 右管为 4.9 mm, 年最大变幅小于 0.1 mm, 变形已稳定。

(4) 管道进出口和钢管支墩沉降监测。在进口镇墩设置 1 个监测断面, 3 个测点, 镇墩各测点竖向位移较小, 均表现为向上抬升。至 2015 年 8 月最大竖向位移量为  $-9$  mm, 变形已经稳定; 在出口镇墩也设置 1 个监测断面, 设 3 个测点, 各测点竖向位移表现为沉降, 至 2015 年最大竖向位移为 15 mm, 出口镇墩竖向变形已经稳定, 出口闸室基础稳定; 钢线支墩上设有 6 个沉降测点, 至 2007 年各测点最大沉降量仅为 2 mm, 支墩变形稳定。

(5) PCCP 管道预应力钢丝检测。由于工程冬季不运行, 有条件采用电磁法 (P-WAVE) 技术对管

道进行预应力钢丝的断丝检测, 根据检测结果进行评估预警, 以确保运行安全。本工程分别在 2010 年、2012 年和 2015 年进行了三次检测, 检测结果表明目前管道运行状态良好<sup>[26]</sup>。

## 4 结论

(1) 工程总体布置合理, 设计采用 PCCP 管道和钢管相结合的形式, 在满足安全可靠的前提下, 节省了工程投资, 也为新型管道技术的引进和发展, 提供了成功的应用平台。

(2) 工程运行后, 主要针对管道内水压力、环向应力、接头变形、径向变形、管道渗漏、钢管段镇墩和支墩沉降变形等项目开展了系统的安全监测, 共布置了 102 个测点。监测资料及工程安全评价表明: 钢管实测最大环向应力、伸缩节累计和历年最大变

形量、伸缩节实测最大绕曲和偏位变形均小于设计允许值;进出口闸室结构、管道各镇墩和支墩以及接头竖向变形量小并趋于稳定。

(3) 通过模型试验研究确定的闸门开度、关闭速率、充水排气、放空排水等水力安全控制关键技术,科学合理,并在实践运行管理中得到了较好的应用。

#### 参考文献:

- [1] 石 泉,张立德,李红伟.大型倒虹吸工程设计与施工[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [2] 陈湧城.长距离管道输水工程的安全性及水锤危害防护技术[J].给水排水,2014,40(3):1-3,22.
- [3] AWWA. Prestressed Concrete Pressure Pipe, Steel-Cylinder Type: ANSI/AWWA C301 - 2007 [S]. USA: AWWA, 2007.
- [4] AWWA. Design of Prestressed Concrete Cylinder Pipe: ANSI/AWWA C304 - 2007[S]. USA: AWWA, 2007.
- [5] 中国工程建设标准化协会.给水排水工程埋地预应力混凝土管和预应力钢筒混凝土管管道结构设计规程:CECS140:2011[S].北京:中国计划出版社,2011.
- [6] 中国建筑材料工业协会.预应力钢筒混凝土管:GB/T 19685 - 2005[S].北京:中国计划出版社,2005.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.给排水管道工程施工及验收规范:GB 50268 - 2008[S].北京:中国计划出版社,2008.
- [8] 中华人民共和国水利部.预应力钢筒混凝土管技术规范:SL702 - 2015[S].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [9] 蒋东方.正反悬链线形倒虹吸管身断面形式的研究[D].郑州:华北水利水电学院,2011:52-78.
- [10] 杨成龙,缙慧娟,卢晓仓,等.南水北调中线工程倒虹吸弧形闸门放样方法的研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(2):35-37.
- [11] 吴 宏,李德寿.湖南新安铺倒虹吸管工程在国内领先[J].人民长江,1987(10):65.
- [12] 张长根.河南最大的倒虹吸工程在灵宝县建成[J].人民黄河,1993,36(8):40.
- [13] 朱 涛,付英华.长距离、高水头倒虹吸设计与运行经验[C]//山东水利学会.济南:山东水利学会第十届优秀学术论文集,2005:265-267.
- [14] 常 胜,牧振伟,万连兵.大口径玻璃钢管承插式接头局部水头损失系数探究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(4):96-100.
- [15] 余际可,黄兴军.浅析当前预制圆管管座施工方法存在的问题——中空式管座的特点及施工方法简介[J].给水排水,1996,22(7):50-52.
- [16] 魏昌林.埃及西水东调工程[J].世界农业,2001(8):26-28.
- [17] 汪秀丽.国外流域和地区著名的调水工程[J].水利电力科技,2004,30(1):1-25.
- [18] 中国水利水电科学研究院.三个泉倒虹吸水力计算报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2002.
- [19] 贺青奇,徐元禄.大型倒虹吸工程运行管理[J].水利建设与管理,2007,27(9):57-60,74.
- [20] 中国水利水电科学研究院.三个泉倒虹吸进出口水工模型试验研究报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2001.
- [21] 长江水利委员会长江科学院.三个泉倒虹吸扩建工程水力学数值分析报告[R].武汉:长江水利委员会长江科学院,2014.
- [22] 新疆农业大学水利水电设计研究院.三个泉倒虹吸底部排空水力学模型试验报告[R].乌鲁木齐:新疆农业大学水利水电设计研究院,2002.
- [23] 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局.三个泉倒虹吸 PCCP 管道工程安装质量控制指标及检测要求[R].乌鲁木齐:新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局,2005.
- [24] 王 兵,白文举,徐元禄.高工压大口径 PCCP 管在引额济乌工程中的应用[J].水利建设与管理,2007,27(2):34-36.
- [25] 陈昌雄,李红伟.倒虹吸大型压力钢管大变位伸缩节的设计及制造[J].水利规划与设计,2005(3):51-54.
- [26] 蓬勃上海工程技术服务公司.三个泉倒虹吸 DN2800 PCCP 管道电磁法检测报告[R].上海:蓬勃上海工程技术服务公司,2015.