DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2019.05.009

新疆长距离输水管道工程管材选择与安全防护技术进展

李 江[1], 杨辉琴[1], 金 波[2], 黄 涛[1,3]

(1. 新疆水利水电规划设计管理局,新疆 乌鲁木齐 830000;
2. 西安普特流体安全技术咨询有限公司,陕西 西安 710003; 3. 中国水利水电科学研究院结构材料研究所,北京 100038)

摘要:根据各种管材及输水工程安全防护的特点和发展趋势,结合新疆高严寒、高地震、多泥沙、侵蚀复杂的特殊环境,总结和回顾了各种管材及安全防护技术在新疆长距离输水管道工程中的应用进展和主要成果,分析了输水管道安全防护中存在的问题,指出了管材选择应考虑的主要因素及输水工程技术发展趋势,对今后的发展提出了建议。

关键词:长距离输水;管道工程;管材;水锤;安全防护

中图分类号:TV67;TV68 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-7647(2019)05-0056-10

Progress for pipe selection and safety protection technology of long distance water transfer pipeline engineering in Xinjiang//LI Jiang[1], YANG Huiqin[1], JIN Bo[2], HUANG Tao[1,3] (1. *Xinjiang Administration of Water Resources and Hydropower Planning and Design*, *Urumqi* 830000, *China*; 2. *Xi' an Pute Fluid Safety Technology Consultancy Co.*, *Ltd.*, *Xi' an* 710003, *China*; 3. *Department of Structures and Materials*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: According to the characteristics and development trend of pipes and safety protection of water transfer engineering, the application advance and the main achievements of various pipes and safety protection technology of long distance water transfer pipeline engineering in Xinjiang were summarized and reviewed, combined with the special conditions of extremely cold, frequent earthquake, multiple sediment and complex erosion in Xinjiang. The problems existing in safety technology of water transfer pipeline were analyzed. The main factors considered in pipe selection and the technology development trend of water transfer engineering were proposed. Proposals for future development were also put forward.

Key words: long distance water transfer; pipeline engineering; pipe material; water hammer; safety protection

新疆水资源空间、时间分布极不均匀,在实施流域内水资源合理配置及开发利用的背景下,通过兴建引、调水工程,以解决地域、县域之间的供水问题,管道输水工程成为首选。如 2005 年建成的北疆输水工程中的小洼槽倒虹吸、三个泉倒虹吸工程[1],2008 年建成的罗布泊钾盐外部输水工程[2],2015 年建成的乌鲁木齐市大西沟管道引水工程等[3]。管道输水工程在减少安全运行风险、减少渗漏损失、提高输水效率、延长输水时间等方面具有优越性,已被更多用户接受。各种输水管材及各类防止水锤的安全防护设备在多个项目上得以应用实践。

为保证长距离输水管道的安全运行,笔者统计了 20 项已建、在建新疆长距离输水工程及防护型式(表 1),梳理了各种管材及安全防护技术在新疆长距离输水管道工程中的应用进展和主要成果,指出今后应该关注的问题。

1 管道建设运行环境

1.1 高严寒

新疆北疆大部分地区处于冷空气通道,气候寒冷,1 月平均气温一般约为-10℃,最低达-30℃;南疆有天山做屏障,冷空气不易侵入,冬天一般没有积雪。干燥、多风、严寒的气候环境对水工及金属结构的耐久性、管材现场防护、接口处理、施工进度安排与效益发挥、冬季施工措施、运行期保温等提出了更高的挑战。如北部渠道供水工程设计年运行 195 d,实际仅达到 150 d,末端配套的管道工程就要兴建更大容量的调节池来满足运行时间要求。

1.2 高地震

新疆地质构造运动强烈,频发地震。强烈地震

基金项目:新疆天山雪松创新领军人才培养计划(2018XS22);国家重点研发计划(2017YFC0504503);新疆天山英才工程第二期(2016—2018 年)培养计划

作者简介:李江(1971—),男,教授级高级工程师,主要从事水资源规划与水工结构设计研究。E-mail: lj635501@126.com

表 1　近年来已建和开展前期工作的新疆典型长距离输水工程及防护型式

项目	年输水量/亿 m^3	输水方式	管道长度/km	扬程/m	管材	主要安全防护措施
察县伊南输水工程	0.45	扬　水	54.26	110	DN1200 浸塑 SP	两阶段液控缓闭止回阀、分水口可调式减压阀、末端设稳压持压阀、组合式空气阀
阿拉山口输水工程	0.22	重力流	47.75		DN800 PCCP	减压池、多喷孔消能阀、进排气阀
精阿输水工程	0.58	重力流	102.68		DN1620/1220/1020/820/630 3PE SP	减压池、淹没式套筒消能阀、恒速缓冲进排气阀
塔城白杨河引水工程	0.42	重力流	113.01		DN1600 FRPM	箱式双向调压塔、排气阀
托里县城乡输水工程	0.03	重力流	37.5		DN710/600/500/400/250 SRTP	减压池、进排气阀
“500”东延输水工程	1.0	扬　水	213.1	268.5	DN1800/1200/3000 PCCP	两阶段液控缓闭阀,多功能水力控制阀、管线采用压力水箱、缓冲式复合进排气阀
准东工业园二级输水	0.43	扬　水	17.8	214	DN1200～1400 PCCP	泵站采用多功能水力控制阀,管线采用超压泄压阀、缓冲式复合进排气阀
老君庙输水工程	0.32	扬　水	56.82	240	DN1200 PCCP	泵站采用多功能水力控制阀,管线采用超压泄压阀、缓冲式复合进排气阀
小洼槽倒虹吸		重力流	5.35×2		DN3100 FRPM	进排气阀、锥形减压阀、竖井式消能
三个泉倒虹吸		重力流	10.57×2		DN2800 PCCP, DN2700 SP	进排气阀、锥形减压阀、竖井式消能
阜康产业园区扬水泵站工程	0.5	扬　水	51.27	330	DN1400 DIP	泵站采用两阶段液控缓闭阀、水锤消除罐、水锤消除阀,管线采用防水锤空气阀
哈密洛钼矿业输水工程	0.04	扬　水	20.27	463	DN500 DIP, DN400 SP	泵站采用两阶段液控缓闭阀,管线设两阶段和三阶段空气阀
罗布泊钾肥输水工程一期	0.18	重力流	240		DN1000 SP、FRPM	管线中部设减压稳压阀、末端减压调流阀、进排气阀
巴楚县城乡一体化输水工程	0.23	重力流	239.17		DN1400 FRPM, DN600 DIP, DN160 PE	两阶段主管隔断阀、分水口调流稳压阀、进排气阀
柯坪县城乡一体化输水工程	0.05	重力流+扬水	143.22	113	DN700\DN600 涂塑复合 SP	泵站采用两阶段液控缓闭阀、水锤消除罐、超压泄压阀,管线采用空气阀和超压泄压阀
十四师皮墨垦区引水灌溉工程	1.37	重力流	195.0		DN1600 ～ 2400 PCCP, DN1400 FRPM	减压阀、进排气阀、超压泄压阀
吉木乃县扬水工程	0.87	扬　水	42.85	596	DN1200 FRPM	泵站采用多功能水力控制阀、超压泄压阀,管线单向调压塔、防水锤空气阀、复合式空气阀
JK 输水工程		重力流	178×2		DN3000/3400 PCCP	减压池、超压泄压阀、箱式双向调压塔、进排气阀
大西沟引水工程	1.77	重力流	43.2		DN2200 ～ 2400 PCCP, DN2400 DIP	淹没式多喷孔消能阀、消力池、进排气阀
北屯城镇引水工程	0.55	重力流	48.59		DN1600 PCCP, DN1000～1800 SP	管中式固定锥形调流减压阀、进排气阀

注:DN 为公称直径, DN1200 PCCP 表示公称直径为 1 200 mm 的 PCCP。

是威胁管道安全的重要因素,易造成管道接口破坏(如接口填料松动、插头拔出或承口破损等)、管体破坏(如管体产生纵向或斜向裂缝)、连接破坏(如三通弯头、阀门以及连接部位处的破坏)。其中以管道接口破坏最为常见,其次为管体破坏[4]。有的工程沿线存在第四系饱和砂土及淤泥、淤泥质土,在 7 度地震作用下将会发生饱和砂土液化、软土地基震陷。

1.3　多泥沙

新疆中小河流含沙量高,洪水陡涨陡落,易造成泥沙危害。尤其是地处昆仑山脉的南疆河流,如叶尔羌河、盖孜河、克孜河等,含沙量普遍较大。泥沙问题往往会对工程寿命及安全运行造成极大影响,如泥沙进入管道导致管道磨蚀、结构损害失稳、淤积,从而影响输水能力、使用寿命和下游输水水质。早期实施的南疆部分农村防病改水工程由于未对水源进行认真处理,加之管理不善,几年后造成泥沙淤堵报废,教训深刻。

1.4　复杂侵蚀环境

新疆大多数绿洲位于出山口冲积扇下游,地下水聚积,灌溉农业发达,埋地管道所处地层土壤盐分复杂多变,如 PH、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO^{3-}、侵蚀性 CO_2 值的不同均有可能造成管道或混凝土构筑物腐蚀,这属于外腐蚀。同时由于水质的变化或管道材料自身的变化还会造成管道内腐蚀。各种因素对管道的长期腐蚀会破坏管道的受力结构,发生事故,危及工程安全。埋地金属管道防腐蚀问题不容忽视,根据资料统计,埋地金属管道的年腐蚀速度约为 0.2～0.4 mm。

罗布泊钾肥外部输水一期工程钢管段土壤侵蚀环境极其恶劣,采用三布五油作为外防腐,同时辅以阴极保护,维护工作量较大。

2 输水工程管材选择

2.1 常见输水管材特点

近几十年来,管道输水工程发展迅速,目前国内可用于埋地输水工程的管道产品主要有钢管(SP)、球墨铸铁管(DIP)、玻璃钢夹砂管(FRPM)、钢筋混凝土管(RCP)、自应力钢筋混凝土管(SSCP)、预应力钢筋混凝土管(PRCP)、预应力钢筒混凝土管(PCCP)、聚乙烯管(PE)、聚氯乙烯管(PVC)、硬聚氯乙烯管(PVC-U)等各种材质管道,以及由不同材料组成的复合管道,如钢丝网骨架 PE 管(SRTP),管道产品实现了多样化,单项工程的管材选择也从单一的一种管材发展成为依据地质条件、生产能力、运行方式等采用了大中小不同口径与不同材质的组合方案[2-4]。其中适合长距离输水的大口径管道主要是 SP、FRPM、PCCP、DIP,中小口径管道主要是 SP、FRPM、DIP、高密度聚乙烯管(HDPE)、PVC-U、PVC-M。

2.1.1 SP

SP 抗拉强度高,力学性能极好,作为给水管道可以承受极高的内压(>10 MPa)和较高外压,可加工性好,抢修方便,对地基不均匀沉降适应能力强。SP 直径一般为 600 ~ 3 000 mm,最大直径可达 4 000 mm 以上。钢管可方便地与各种闸阀连接,造价相对较高。一般均需要采取内外防腐蚀措施,并辅以阴极保护,当前多采用三层聚乙烯涂覆(3PE)或涂塑进行防腐处理。

2.1.2 DIP

DIP 耐腐蚀性能好、抗震性好、安装使用方便,还具有良好的抗外压能力,可承受内水压力超过 2.0 MPa。管径为 40 ~ 2 600 mm,管节长度一般为 6 ~ 8 m。其造价相对较高,管道外壁通常采用喷锌或沥青防腐,内壁采用内衬水泥砂浆防腐。内衬层新发展出来的聚氨酯涂层、水泥砂浆内衬环氧密封层更是表现出优异的耐化学腐蚀性和耐电蚀性、摩阻小、水力性能优良,可作为传统水泥砂浆内衬的升级换代产品。

2.1.3 PCCP

PCCP 因其独特的抗外压性能,在大口径输水管道中占据着重要地位。PCCP 具有钢材和混凝土各自的特性,抗外压能力较强,接头密封性好,抗震能力强等优点。管径范围一般为 800 ~ 4 000 mm,管节长度为 6 m,内压可达 2.0 MPa。业界比较关注的是预应力钢丝断裂与管道耐久性问题、外壁保护层开裂引起的腐蚀问题。通常外防腐采用煤沥青,内防腐采用内衬砂浆。

2.1.4 FRPM

FRPM 简称玻璃钢管,其特性是摩阻系数小、重量轻、抗腐蚀、耐热抗冻。管道直径一般为 600 ~ 3 600 mm,内压为 0.6 ~ 2.4 MPa,管节长度为 12 m,也可根据使用要求确定单节长度。FRPM 可根据用户的各种要求调整结构铺层设计(结构层厚度、缠绕角度)来满足管体的承载能力,以制成不同压力和刚度的管道。过去,长距离管道中多选择往复交叉缠绕工艺生产的 FRPM,当前主要推广连续缠绕工艺生产的 FRPM。FRPM 造价相对较低,但管壁薄,脆性大,对管道外壁回填土要求较高,常见的白斑鼓包、裂纹等突出问题大多由回填原因造成。

2.1.5 塑料类管材

长距离输水主要使用的是 HDPE、PVC-U,农业灌溉和城乡饮水小口径管道采用 PE、PVC-M 较多。HDPE 具有耐腐蚀、内壁光滑、摩阻系数小、强度高、韧性好、重量轻等特点。口径为 32 ~ 1 000 mm,压力等级在 0.6 ~ 1.6 MPa 之间,管节长度为 6 m、9 m、12 m。管径超过 630 mm 以后造价较高,一般较少采用。为减薄壁厚、降低造价,又发展出波纹 PE、钢带增强波纹 PE 以及 SRTP。这些复合管材克服了塑料管的快速应力开裂现象,具有超过普通纯塑料管的强度、刚性、抗冲击性,管道直径最大可达 2 200 mm,内压可达 3.5 MPa。

PVC-U 是由硬聚氯乙烯塑料通过特殊工艺加工而成的管材,公称直径为 15 ~ 700 mm,管材最高工作压力达 1.6 MPa,管道连接方法有承插式连接和黏结剂黏结两种。在农村饮水、农田灌溉等工程得到广泛应用,市场上多见 PVC-U、PVC-M,目前口径一般不超过 700 mm。

2.2 管材选择的主要影响因素

长距离输水工程前期勘测设计阶段,需要对水源、输水路线、水厂、泵站等进行勘察设计,同时还要根据可能的建厂条件、原材料运输及来源、运行管理等因素对管道进行技术、经济比较,择优选择管材。每种管材因制作工艺差别,均有其自身的优缺点,没有任何一种管材是完美的,也不存在“最优管材”的说法。实际使用中管材选择需要考虑的因素很多,涉及管道材料强度特性、制造与环保、运输方便程度、安装难易程度、防腐蚀性能、接头连接可靠性、长期性能变化等。

采用组合管材的工程越来越多,喀什输水工程规划总长度约 2 000 km,采用 SP、DIP、FRPM、PE 的

组合方案。对于灌溉输水工程,一般情况下田间外部输水按长距离输水工程对待,田间内部大多采用塑料类管材[5]。杜培文[6]对 9 个主要项目、6 个一般项目,设计了各种管材分别对应的性能影响因素的评分表,期望通过评分法及模糊优选理论方法来择优选择管材,做出了有益的尝试和探索。但这种方法类似专家赋分法和层次分析法,带有很大的主观因素和专家个人喜好。

目前没有一种方法可以确定出长距离输水管道工程的“最优管材”。笔者建议综合考虑各类管材的影响因素,提出管材选择的评价指标体系:生产工艺、材料强度与特性、防腐蚀性能、运输要求、安装要求、回填材料、开孔与补修的难易、接头要求、更换管材难易、管壤联合作用体系、保护层脱落、适应水锤的管壁波动、环保要求及适应性、节能性能、长期运行的内壁结垢等。

3 输水工程安全防护技术

输水工程安全防护涉及因素多,产生问题的原因也很复杂,管材与阀门的制造安装、运行管理等都可能出现安全问题。如陕西宝鸡市冯家山水库引水工程爆管事故,运行 9 年 11 次爆裂,研究得出管材存在钢筋用量不足,部分混凝土强度不达标等问题[7]。过去普遍认为只要管材选好了、施工按要求完成就可以,实际上再好的输水管材,无论钢制还是复合材料类,如果没有切实可行的安全防护技术作为保障,一样会产生重大事故。如新疆克拉玛依大农业一段钢管出现负压造成“吸瘪”事故、38 团一段 PCCP 发生爆裂事故、塔城一城乡引水工程玻璃钢管爆管等。

输水工程中的安全防护包括管材安全防护、水锤安全防护、运行安全监测等。管材安全防护包括 SP、PCCP、DIP 的内外防腐与阴极保护,FRPM 的回填材料施工,各种管件的连接、接头抗震等;水锤安全防护包括管道水锤计算分析、水锤防护措施与设备选择、运行中防护设备的联动联调等;运行安全监测包括管道渗漏监测、压力波动在线监测、应急调度、紧急泄压等。

3.1 管材安全防护

长距离输水工程中常用的 PCCP、SP 和钢制管件,其预应力钢丝和管壁在侵蚀性介质环境中会发生锈蚀、电化学腐蚀等问题,影响管道设计强度,导致事故发生。腐蚀防护技术主要包括正确选用金属材料,改变腐蚀环境,采用耐腐蚀覆盖层及电化学保护。目前外热熔 PE 防腐是涂塑复合钢管标准中明确规定的最佳外防腐形式。阴极保护是电化学保护技术的一种,是防止地下金属结构物腐蚀的最为有效的方法。埋地管道采用外保护涂层和阴极保护的双重防腐措施,可使管道腐蚀穿孔泄漏事故明显减少,安全性进一步提高,寿命大大延长。塑料类管道应注意回填问题,同时抗震设计也不容忽视,研究地震工况下各种不同管材的接口、阀门连接段的大变形,避免或减少地震损害是一项重要设计内容。

3.2 水锤安全防护

水锤是压力管道中水流速度剧烈变化引起管路压力交替升降的水力冲击现象,其波速计算是一个非常复杂的过程,到目前为止,还没有一种能精确计算波速的方法。压力管道易发生启动水锤、停泵水锤、关阀水锤及伴生的管道断流弥合水锤,其中停泵水锤和断流弥合水锤危害最大。

水锤模拟软件种类繁多,美国奔特力 Water Hammer 软件、KYPipe 软件、InfoWorks WS 软件在国内外应用较多。输水管道进行水锤分析计算的主要目的是在管道稳态、瞬态分析的基础上选择合适的水锤防护设备,防护分析的目的主要是防止水锤现象的发生,使输水系统保持正常工况。不同的防护设备有着不同的应用条件,对于长距离大型输水工程通过模拟不同工况、采用不同设备进行管网模拟分析是设计阶段的一项重要内容。表 1 中提到的 20 项工程均采用了不同型式的组合式防护方案,大多数工程建成使用至今,运行均正常,由此可以看出防护设备的多样性。

各种先进的水锤防护措施应运而生,如气压罐、减压阀、稳压阀、调压塔、排气阀、水锤控制阀等。值得注意的是,随着输水工程的复杂性和多样性的增加,一些新型控制阀、空气阀和气囊式压力罐虽已在输水工程中获得应用,但它们的水锤防护效果、适用条件值得研究[8]。

3.3 运行安全监测

管道运行安全监测近年来受到高度重视,全部管网进行在线监测目前尚存在一定难度,一般都是结合水锤防护设备、高压力地段、强腐蚀地层等进行间断性监测,难以形成完整的监测数据,更难以提前对管道进行安全预警。传统监测方法通常埋设渗压计、应力应变计、锈蚀仪等监测仪器,通过监测各测点的渗压、变形、钢管锈蚀等进行预警,但存在大量监测盲区,精度及实时性都不够,不能进行全管段在空间和时间上的连续监测,预警功能差,新疆已建成的大型压力输水管道大多都没有埋设传统的监测仪器。

3.4 存在问题

以输水管道系统中最重要的安全防护设备为

例,如空气阀、控制阀等,国内仅有要求很低的行业标准,而水锤消除罐根本无标准可依。虽然很多工程设计都采用了大量的防护设备,但实际选用与设计仍存在较大差异,尤其是低价中标的招标方式,个别工程关键设备粗制滥造屡禁不止,严重影响工程安全。与欧美发达国家相比,我国尚未具备专业检验实验室,最为突出的是实验参数要求低和缺乏耐用性实验,这直接导致伪劣质次的阀门产品在输水工程中泛滥成灾,为输水工程埋下重大隐患。如果设备的质量和性能无法保证,则管道系统的安全运行无从谈起,即使选择再贵的管材也不能杜绝爆管事故。从众多输水工程设计报告分析,设计缺乏系统的运行过程要求,对于一些大流量多级扬水泵站问题尤为严重,一级出现运行故障,剩余几级产生连锁反应,出现问题也无法进行处理,仅仅是关阀了事,造成输水中断。

4 输水工程技术发展趋势

4.1 管材技术发展趋势

伴随着管道工程对工程质量、投资、运行和管理的更高要求,各种管道产品也从材料、加工、生产等各方面不断改进、吸收国内外先进经验,管道产品的更新换代迅速。

4.1.1 SP

大口径输水钢管通常具有30年以上的使用年限,其检修和改造的工程量大且费用高、发生腐蚀也不易察觉,采用可靠的防腐蚀措施是提高运用寿命的重要手段[9]。目前外防腐涂层主要是涂塑、3PE、沥青等,内防腐涂层是水泥砂浆、环氧粉末涂层等。师立功[10]的研究表明,涂塑钢管应用内熔结环氧粉末(FBE)、PE粉末为最佳防腐工艺组合,其防腐性能优于其他体系防腐层。

钢管连接段管道内衬或内防腐涂层现场施焊时,焊缝两侧的防腐层会由于高温作用而破坏,内补口技术也成为影响管道质量的主要因素。先焊后补是当前管道内防腐采用的主流形式;先补后焊采用内衬保护套(管)、不锈钢接头等方法进行处理,不锈钢接头技术的优点是有效地解决了接头的耐腐蚀问题,即使不锈钢环焊口处出现涂层脱落,也不会影响整体管道的耐蚀性及使用寿命[11],但增加了焊口的数量,质量不易保证;机械连接法、焊后不补法等也有应用。这些方法各有优缺点,还需要深入研究能彻底解决内防腐涂层管道焊口防腐问题的关键技术。

输水钢管大多采用对接焊或者法兰连接。对于城市地下设施要求快速施工的管道或高地震区管道采用承插式连接是一种较好的选择,采用承插连接的钢管在国外已被广泛使用超过60年,具有对接速度快、适应地质不均匀沉降的特点。在非开挖的穿越钢管施工中,还可以使用丝扣承插式钢管连接,同样可达到快速施工的目的[12]。

4.1.2 DIP

DIP采用胶圈密封T型柔性接口,很好地适应了管道地基不均匀沉降;可以原土回填和即时开挖、回填作业不易受外部天气影响;良好的可切割性满足随时调整管道实际安装的需要;管道维修时,也可采用哈夫节对破损管道实现带水作业抢修[13]。

早期DIP(K级管)生产标准是以管材壁厚等级分类,壁厚随管道公称直径增加呈线性增长。管道的工作压力和环刚度的变化无法体现工作环境的要求[14],造成中低压管道设计普遍浪费,经济上不占优势。ISO2531:2009管道标准(C级管)颁布后,相应制造、生产标准、规范都进行了调整,C级管是从产品使用性能角度来定义的。在项目审查过程中笔者发现,设计者普遍不理解K的含义,尤其是改成C级后也不甚了解,实际上增加的C等级环刚度的计算方法,有助于提高管道及管线设计,但行业推广方面还需要加大力度。铸造行业一直是高污染高能耗行业,绿色铸造是DIP未来发展的头等大事[15]。

传统DIP接口形式有T型、K型、N1型、S型等,已建大西沟管道引水工程采用了机械式的K型接口。国内先进制造商已经拥有多种自锚接口,如新兴锚大口径高压自锚接口,承口设置了自锚仓和密封仓,无须法兰、压兰、螺栓、螺母等附件,施工方便,节省安装时间,在高震区使用时值得深入研究。

4.1.3 PCCP

当前PCCP最大口径达4 000 mm,最大工作压力达1.6 MPa,最大覆土深度已超过10 m,每年生产数量已达数千千米。重大工程建设对高工压、高抗渗、大口径、长距离需求巨大。PCCP发展面临的最大问题是预应力钢丝失效和监测问题、环向裂纹问题。

国家科技支撑计划项目“南水北调超大口径PCCP管道结构安全与研究”研究成果给出了断丝数量与PCCP管的整体工作性能间关系的定性评价,当断丝数超过25根时,在外部荷载、自重作用且无内水压作用时混凝土发生开裂;有内水压作用时,裂缝内的水会引起钢筒或钢丝层腐蚀,影响PCCP的耐久性[16]。2010年3月采用加拿大Pure Technologies公司的P-Wave电磁波探测设备,对已运行5年的新疆北部输水的3个泉倒虹吸PCCP预应力钢丝进行了检测[17];近几年又陆续开展了检测,大约有接近1%的管道出现断丝,但并不影响运行;国外及国内油气管道的风险评价表明该工程处

于中等风险,劣化速度较低。2015 年对准东输水工程直径 1 800 mm 的 PCCP 进行了检测,最大疑似断丝数量为 25 根,小于屈服极限所允许的断丝数量 45 根,因此目前断丝程度尚不会严重影响到结构安全[18]。当前对 PCCP 的检查、监控、状态评估及预警技术的研究已成为 PCCP 应用的重点。

PCCP 保护层发生环向空鼓裂缝会造成钢丝的腐蚀,而产生 PCCP 环向裂纹的原因很多。研究表明,采用严格的生产工艺控制、在两端钢筒内侧增加非预应力钢丝骨架或在混凝土内部掺入纤维可有效消除环向裂缝。

宁夏青龙管业股份有限公司联合南京水利科学研究院合作研发的钢筋缠绕钢筒混凝土压力管(BCCP),针对 PCCP 高强钢丝潜在脆化、保护层空鼓裂缝及由此产生的腐蚀等问题进行了改进,同时优化了承插口和管身防腐,大大提高了管道的耐久性。管径可在 500 ~ 3 000 mm 之间,工作压力为 0.8 ~ 2.0 MPa[19],已在一定范围开展应用。

4.1.4 FRPM

FRPM 管道按生产工艺分为离心浇筑式、定长缠绕往复交叉式、连续缠绕式 3 类,其中离心浇筑式一般用于无压输水,缠绕式用于中高压输水。FRPM 管道在新疆应用时间较长,也积累了丰富的实践经验,如表 1 提到的小洼槽倒虹吸工程,二期工程同样采用直径 3 700 mm 的 FRPM。与往复交叉缠绕管道相比,连续缠绕管道的环向弯曲强度高 20%,轴向拉伸强度高 50%,管道挠曲性能高 30%,安全性能进一步提升,应在行业大力推广。

FRPM 存在的突出问题是回填材料导致的管壁损伤破裂问题,这是玻璃钢管道的“硬伤”。比如岩石段应严格按要求回填有粒径限制要求的砂砾石,但往往将较大的有棱角的石头回填至管道周边,造成管壁出现白斑、裂纹,严重影响管道安全。笔者建议研究一种可以抵御一定程度冲击的外保护层,出厂时敷设在管道外壁,防止尖角硬物的损伤。

有的设计人员不理解刚度 S_n 的含义,提出采用 $S_n = 15$ kPa 作为 DN1000 管道的设计刚度,理由是提高环刚度就能解决施工的野蛮回填,这是完全错误的。中等口径的管道不宜选用刚度超过 10 kPa 的管道[20],常用的 $S_n = 5.0 \sim 7.5$ kPa。特殊地层采用玻璃钢夹砂管道时,应对铺层设计、树脂含量等进行专门的研究。

管道上直接开孔或手工糊制生产异径连接管、三通、四通等往往效果很差,主要在于手工糊制件质量难以控制。笔者建议连接件采用钢制成品件为宜。

4.1.5 塑料类管材

增强热塑性塑料复合管(RTP)是近年来新兴的一种塑料管道,包括金属增强复合管和非金属增强复合管,主要优点是耐压、耐腐蚀、质量轻、成本低,克服了钢管的腐蚀问题以及塑料管道的耐压问题。由于塑料类管材具有自增强的特性,技术一直在不断进步,组合品种层出不穷[21-22]。如钢增强塑料增强管道,曾经有不少种类,经过市场竞争,大浪淘沙,目前基本上只留下钢丝网骨架塑料(聚乙烯)复合管和给水用钢骨架聚乙烯复合管[23]。

PE 管道受结构限制,管径增加后壁厚增加较多,投资显著增加。目前在长距离输水中 PE 主要是大口径高密度 HDPE 管(已知最大管径 1 600 mm)和钢丝网骨架 SRTP 管(管径大多不超过 800 mm)。南水北调邢清干渠中一段长 44 km 管道采用 DN1200、DN1400 HDPE 管道[24]。国内外还在探索钢增强、短纤维增强、连续玻纤增强等多种复合管道,这些管道的面世进一步丰富了管材选择的范围。

PVC 管由传统的 PVC-U、PVC-M 向更高强度的 PVC-UH 和高韧性的 PVC-O 方向发展。新疆 PVC-U、PVC-M 主要用于农业灌溉和防病改水,目前在防病改水项目上也逐步淘汰了 PVC-U,多采用 PE 代替,主要是因为 PVC-U 生产门槛过低,粗制滥造。PVC-O 表现出的优异特性受到业界青睐,美中不足是造价过高、技术上还存在很多需要突破的障碍[25]。近几年发展迅速且有代表性的是 PVC-UH,口径范围 20 ~ 1 600 mm,压力等级 0.63 ~ 2.5MPa,目前已在新疆库尔勒某输水项目中对直径 1 200 mm 的 PVC-UH 管道开展试验研究工作。

2014 年通过鉴定的竹复合压力管,具有价格便宜、耐压比强度高、刚度大、水流性能佳、安装方便等特性[26],已被列入水利先进技术推广项目,但在高严寒地区其耐久性还需要进一步检验。

4.2 安全防护发展趋势

4.2.1 防护设备

研究表明,合理地选择并设置水锤防护装置,通过降低管路系统中流速梯度来消减或消除水锤是可靠的[27]。水锤引起管路瞬时压力升降值很大,国内检测到瞬时压力达到 2 ~ 4 倍工作压力[28]。安全防护是长距离管道的重要组成部分,传统的水锤防护设施都是被动式的,如单向水池、调压塔、出口溢流池等;防护设备多采用机械式的空气罐、空气阀、调压阀、超压泄压阀等[29-31]。对于特殊的前陡后缓外加起伏多变的供水管线,单纯采用调压室或空气阀一种防护措施,会造成防护措施体型变大加厚,经济成本增加。有学者也提出调压塔和空气阀联合、空

气罐和出口溢流池联合等防护方案,以弥补空气罐体积大、空气阀安装位置和进排气口径等单一防护措施所带来的功能缺陷问题,有效地解决了管线内部超标正(负)压的控排问题[32-34]。在实际工程应用中,组合防护方案也存在不足,如上游空气罐和下游阀联合防护方案中,在减小上游空气罐的体积和增加下游管壁厚度之间需要选取合适的权衡点,才能取得比较好的经济性[35]。

杨勇智等[36]基于"减缓水在系统中的流速变化,降低机械波的传递速度"研究了主动式水锤防护原理,并提出了一系列水锤防御工程方案及设备。该原理是建立在能感应水锤发生的前兆或引起水锤的起因条件,考虑到水锤波速可达到 1 000 m/s 以上,真正利用可编程逻辑控制器(PLC)智能控制实现闭环系统的自动化主动水锤防护值得商榷,也未见成功的工程应用案例。

4.2.2 计算分析手段

管道水锤主要有 3 大类:关阀水锤、停泵水锤及启动水锤。水锤计算方法主要有图解法、特征线法(MOC)和波特性法(WCM)等[37-38],其理论基础都是水锤基本微分方程式。迄今 MOC 一直是著名和广泛应用的水击计算分析的基本方法,并开发出以 Hammer 为代表的软件,该方法利用欧拉显式有限差分法迭代求解。中国市政工程华北设计研究总院和西安工业大学合作完成的"水锤计算分析软件的研制"采用目前较成熟的特征线法,开发出集数据输入、存储、计算、查询、分析、图形模拟多功能于一体的水锤计算分析可视化软件[39]。

美国肯塔基大学土木工程系的 Wood 教授提出了拉格朗日隐式求解的波特性法,以瞬态管流源于管道系统水力扰动中的压力波的发生和传播为理论基础,通过追踪水锤波的发生、传播、反射和干涉,来计算各节点不同时段的瞬态压力值。波特性法在大型管网进行水力计算时的速度优势非常显著。李江等[40]采用 KYPipe 软件分析了乌兹别克斯坦某城市长距离多支管输水工程,提出了分级减压的优化建议,取得了显著效果。在考虑管道摩擦影响时,MOC 和 WCM 两种方法都能够准确地解决配水网络中的瞬态压力和流量。考虑波传播和管道摩擦的影响时,MOC 需要在内部点进行计算,而 WCM 使用压力波处理这些影响。因此,对于相同的模型精度要求,WCM 通常需要较少的计算时间,更适合于计算复杂管网。

由于计算手段的复杂性,同一个项目多家科研单位提出的水锤防护方案也存在成果难以比对的难题,设备不同、结果不完全相同,业主和审查机关有时也难以定夺,亟待进一步规范。

4.3 运行安全监测

目前已有诸多检测与定位方法可用于查找管道渗漏病害,主要的方法包括被动检测法、听音检测法、相关分析检测法、探地雷达检测法、示踪剂检测法、分布式光纤法等[41]。但当管道处于复杂环境中,且出现诸如渗漏、穿孔、断裂、沉陷等问题时,目前还没有高效、快速处理管道渗漏病害探测问题的方法。因此需要提出更加有效的渗漏检测方法以解决长距离管道的渗漏问题。电磁探测和声发监测技术的成熟,催生了对已建和在建 PCCP 管道检测、监测,断丝爆管预警技术已经较为成熟,这对保护管道运行安全意义重大。利比亚大人造河工程、南水北调工程等均针对 PCCP 开展了大量的在线监测研究实践,取得了较好的效果。凌骐等[42]基于 DN3200 的管道渗漏监测研究表明,现有仪器所能监测到的最小渗漏量指标仍然有待提升。鄂北地区水资源配置工程倒虹吸 PCCP 管道的监测设计,可为 PCCP 管道结构安全评价提供合理的数值依据[43]。

5 结 论

a. 当前提高水安全保障能力对各种管道发展提出了更高的要求,更大口径、更高工压、更强的防腐性能、更方便的接口、更好的防渗性能、更长的使用寿命、便于更换维护等应是管道行业的追求目标。管材选择没有最优,在合适的条件下选择适宜的管材是设计者应重点考虑的。

b. 水锤防护仍然是长距离输水工程安全防护的重点,防护设备与计算分析手段密切相关,不同的软件、不同的防护设备会带来不同的分析结果,需要引起业界高度关注。主动式水锤防护设备和一些新设备近年来发展迅速,如压力波动预防阀、水锤预防阀、水泵控制阀、气压罐、减压阀、稳压阀、水锤控制阀等,在不同的工程都有应用,但它们的水锤防护效果、适用条件还需要进一步研究。把各种设备统一纳入安全防护管理应是当下重点研究的问题。

c. 在线监测是长距离管道设计的难点,随着技术的发展,各种监测方法应运而生,但目前尚未有一种方法能够高效、快速监测所有输水过程中产生的问题,包括变形、渗漏、沉降等,也难以提出预警。复杂输水管网往往还存在应急调度、检修维护等复杂工况,更需要引起业界重视。

d. 对于长距离输水管道工程开展仿真模拟技术研究,制定完整和严格的防护方案,有利于提升管道工程质量和安全等级。

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] 陈学光,雷正龙,何卫军. 罗布泊外部供水管线管材比选简介[J]. 中国水运, 2010, 10(11): 175-176. (CHEN Xueguang, LEI Zhenglong, HE Weijun. Introduction to the comparison of external water supply pipelines in Lop Nur[J]. China Water Transport, 2010, 10(11): 175-176. (in Chinese))

[3] 孔晓阳. 大口径高压力球墨铸铁管在大西沟管道引水工程中的应用[J]. 广西水利水电, 2016(3): 81-83. (KONG Xiaoyang. Application of large diameter and high pressure ductile iron pipe in Daxigou water diversion project[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering,2016 (3):81-83. (in Chinese))

[4] 郭天木,王水华,李健. 埋地给排水管道的震害与抗震设计[J]. 特种结构, 2009, 26(5): 30-36. (GUO Tianmu, Wang Shuihua, LI Jian. Earthquake damage and seismic design of buried water supply and drainage pipelines[J]. Special Structures,2009, 26(5): 30-36. (in Chinese))

[5] 白静,谢崇宝. 灌溉输水管道现状及发展需求[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 34-39. (BAI Jing, XIE Chongbao. Current status and development needs of irrigation water pipelines[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4): 34-39. (in Chinese))

[6] 杜培文. 长距离输水工程应用技术研究[M]. 河南: 黄河水利出版社, 2009.

[7] 中国网. 陕西宝鸡市输水管道9年来第11次爆裂[EB/OL]. [2008-12-17]. http://www.china.com.cn/news/txt/2008-12/17/content_16961039.htm

[8] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J]. 水利学报, 2016, 37(3): 424-435. (YANG Kailin. Review and frontier scientific issues of hydraulic control for long distance water diversion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 37(3): 424-435. (in Chinese))

[9] 陈娟. 长距离大口径输水钢管的腐蚀防护[J]. 给水排水, 2009, 35(增刊1): 409-411. (CHEN Juan. Corrosion protection of long distance & large-diameter water transmission steel pipes[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(Sup1): 409-411. (in Chinese))

[10] 师立功. 大口径涂塑钢管内外防腐涂层选择[J]. 特种结构, 2016, 33(5): 99-103. (SHI Ligong. Selection of internal & external anticorrosion coatings for large diameter plastic-coated steel pipeline[J]. Special Structures, 2016, 33(5): 99-103. (in Chinese))

[11] 王振科,游正安,吴洪涛等. 管道内防腐层补口技术研究进展[J]. 管道技术与设备, 2012(3): 48-50. (WANG Zhenke, YOU Zhengan, WU Hongtao, et al. Research on the internal field joint coating of oil and gas pipelines[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2012(3): 48-50. (in Chinese))

[12] 夏连宁. 大直径钢管承插式连接在输水管道中的应用[J]. 焊管, 2015, 38(9): 45-49. (XIA Lianning. Application of large diameter steel pipe spigot joint in water pipeline[J]. Welded Pipe and Tube, 2015, 38(9): 45-49. (in Chinese))

[13] 李晓明,白占顺,王宁. 大口径球墨铸铁管用于长距离输水工程的优势分析[J]. 中国给水排水,2015, 31(14): 30-33. (LI Xiaoming, BAI Zhanshun, WANG Ning. Performance analysis of large diameter ductile iron pipes in large-scale water diversion project[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(14): 30-33. (in Chinese))

[14] 丁江新,李江. 新疆长距离管道供水工程设计与施工误区探讨[J]. 水利建设与管理, 2015(3): 33-36. (DING Jiangxin, LI Jiang. Discussion on Xinjiang long-distance pipeline water supply project design and construction mistakes[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2015(3): 33-36. (in Chinese))

[15] 刘明忠. 中国离心球墨铸管行业的现状和发展[J]. 中国冶金, 2016, 26(5): 1-7. (LIU Mingzhong. Status and development of centrifugal ductile iron pipe industry in China[J]. China Metallurgy, 2016, 26(5): 1-7. (in Chinese))

[16] 田华. PCCP成长期的隐忧及未来发展趋势[J]. 混凝土世界, 2015(8): 39-36. (TIAN Hua. The hidden worry and future development trend of PCCP growth period[J]. China Concrete, 2015(8): 39-36. (in Chinese))

[17] 董亮,阿里木江,贺青奇. 某供水工程倒虹吸PCCP状态评估、风险评价及运行管理[J]. 特种结构, 2014, 31(1): 100-103. (DONG Liang, ALIMUJIANG, HE Qingqi. Condition assessment, risk evaluation and operation management of the siphon PCCP in a water supply project[J]. Special Structures, 2014, 31(1): 100-103. (in Chinese))

[18] 徐维强,王五平. 准东供水工程PCCP预应力钢丝完整性检测及结构评估[J]. 特种结构, 2017, 34(2): 113-115. (XU Weiqiang, WANG Wuqiang. Integrity inspection of prestressed wire and structure evaluation of PCCP in Zhundong Water Supply Project[J]. Special Structures, 2017, 34(2): 113-115. (in Chinese))

[19] 胡少伟. PCCP在我国的实践与面临问题的思考[J]. 中国水利, 2017(18): 25-29. (HU Shaowei. Considerations on practice and problems of PCCP in China[J]. China Water Resources, 2017(18): 25-29. (in

Chinese))
[20] 周仕刚,薛元德.玻璃钢夹砂管道工程中两个值得重视的问题[J].特种结构,2013,30(2):95-99.(ZHOU Shigang, XUE Yuande. Two issues worthy of attention in the FRPM project[J]. Special Structures, 2013, 30(2): 95-99.(in Chinese))
[21] 孙岩,张友强,刘美苓等.自增强塑料管材的研究进展[J].中国塑料,2018,32(1):1-6.(SUN Yan, ZHANG Youqiang, LIU Meiling. Research progress of self-reinforced plastic pipes[J]. China Plastics, 2018, 32(1): 1-6.(in Chinese))
[22] 王大鹏,孙岩,张友强,等.增强热塑性塑料复合管的现状及进展[J].塑料,2017,46(4):69-72.(WANG Dapeng, SUN Yan, ZHANG Youqiang, et al. Present situation and development of reinforced thermoplastic plastic[J]. Plastics, 2017, 46(4): 69-72.(in Chinese))
[23] 北京塑料工业协会.中国塑料管道市场分析报告—钢增强塑料管道市场前景[J].塑料工业,2011,39(11):118-147.(Beijing Plastic Industry Association. Report on Chinese plastic pipe market: market outlook of steel reinforced plastic pipe[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(11):118-147.(in Chinese))
[24] 朱永涛,杨蒙,张志华等.大口径 HDPE 输水管道在南水北调工程中的应用[J].水科学与工程技术,2015(6):53-56.(ZHU Yongtao, YANG Meng, ZHANG Zhihuan, et al. Application of ultra-large diameter long-distance HDPE pipes in the South-North Water Diversion Project[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2015(6):53-56.(in Chinese))
[25] 马建华,郑化安,王小宪,等. PVC-U 管材的技术现状和发展趋势[J].聚氯乙烯,2017,45(9):7-10.(MA Jianhua ZHENG Huaan WANG Xiaoxian, et al. Technical status and development trend of PVC-U pipes[J]. Polyvinyl Chloride, 2017, 45(9): 7-10.(in Chinese))
[26] 陈复明,王戈,程海涛,等. 新型竹纤维复合材料的研发[J].东北林业大学学报,2016,44(2):80-85.(CHEN Fuming, WANG Ge, CHENG Haitao. Development of advanced bamboo fiber based composites material[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(2): 80-85.(in Chinese))
[27] 宋芹,赵星明,艾典胜. 输水管道水锤分析与防护技术[J].山东农业大学学报(自然科学版),2017,48(1):84-87.(SONG Qin, ZHAO Xingming, AI Diansheng. The analysis and the project technology of water hammer in water pipeline[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 48(1): 84-87.(in Chinese))
[28] 陈涌城.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):1-4.(CHEN Yongchen. Safety and water hammer hazard protection technology of long distance pipeline water transmission engineering[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(3):1-4.(in Chinese))
[29] 邓安利,蒋劲,兰刚,等.长距离输水工程停泵水锤的空气罐防护特性[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(3):402-406.(DENG Anli, JIANG Jin, LAN Gang, et al. Research on protective properties of air vessel for pump-stopping water hammer protection of long distance pipelines[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(3): 402-406.(in Chinese))
[30] 张健,朱雪强,曲兴辉,等.长距离供水工程空气阀设置理论分析[J].水利学报,2011,42(9):1025-1033.(ZHANG Jian, ZHU Xueqiang, QU Xinghui, et al. Arrangement of air-valve for water hammer protection in long-distance pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9): 1025-1033.(in Chinese))
[31] 黄玉毅,李建刚,付向前,等.长距离输水工程停泵水锤的空气罐与气阀防护比较研究[J].中国农村水利水电,2014(8):186-188.(HUANG Yuyi, LI Jiangang, FU Xiangqian, et al. Research on the comparison of air vessel and air valve on pump-stopping water hammer protection of long-distance pipeline[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(8): 186-188.(in Chinese))
[32] 张毅鹏,刘梅清,刘志勇,等.长距离输水管线停泵水锤防护方法分析[J].中国农村水利水电,2018(8):198-223.(ZHANG Yipeng, LIU Meiqing, LIU Zhiyong, et al. An analysis of water hammer induced by pump stoppage in long-distance pipeline[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(8): 198-203.(in Chinese))
[33] 石林,张健,倪尉翔,等.具有特殊地形条件的长距离供水工程水锤防护[J].水力发电学报,2019,38(5):81-88.(SHI Lin, ZHANG Jian, NI Weixiang, et al. Water hammer protection for long-distance water supply projects with special terrain conditions[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(5): 81-88.(in Chinese))
[34] MIAO Di, ZHANG Jian, CHEN Shen, et al. Water hammer suppression for long distance water supply systems by combining the air vessel and valve[J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 2017, 66(5): 319-326.
[35] WAN Wuyi, HUANG Wenrui, LI Cong. Sensitivity analysis for the resistance on the performance of a pressure vessel for water hammer protection[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2014, 136(2): 11303.
[36] 杨勇智,雷蕾,张雁.长距离有压输水管道系统中水锤的主动防御[J].陕西水利,2016(3):66-68.(YANG

Yongzhi, LEI Lei, ZHANG Yan. Active defense of water hammer in long distance pressurized water transmission pipeline system[J]. Shanxi Water Resources, 2016(3): 66-68. (in Chinese))

[37] WOOD D J, LINGIREDDY S, BOULOS P F, et al. Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems [J]. Journal of American Water Works Association, 2005, 97(7): 104-115.

[38] BOULOS P F, KARNEY B W, WOOD D J, et al. Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems [J]. Journal of American Water Works Association, 2005, 97(5): 111-124.

[39] 熊水应,王建国,张凯, 等. 水锤计算分析软件的开发与应用[J]. 给水排水, 2014, 40(11): 104-108. (XIONG Shuiying, WANG Jianguo, ZHANG Kai, et al. Development and application of water hammer calculation analysis software[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(11): 104-108. (in Chinese))

[40] 李江,徐燕,张金承. 长距离重力流输水工程分级减压设计优化与水锤防护分析[J]. 水利水电技术, 2015, 46(9): 89-94. (LI Jiang, XU Yan, ZHANG Jincheng. Optimized design of staging pressure relief for a long-distance gravity flow water conveyance project and analysis on its water hammer protection[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(9): 89-94. (in Chinese))

[41] 褚选选. 基于噪声的长距离输水管道渗漏监测研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.

[42] 凌骐,周林虎,刘广林. 大口径长距离输水管道渗漏原位监测研究[J]. 给水排水, 2014, 40(2): 112-116. (LING Qi, ZHOU Linhu, LIU Guanglin, et al. Study on the in situ leakage detection of the long-distance water transmission pipe with large diameter[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(2): 112-116. (in Chinese))

[43] 魏治文. 鄂北地区水资源配置工程 PCCP 管道安全监测[J]. 人民长江, 2018, 46(增刊1): 106-109. (WEI, Zhiwen. Safety monitoring for PCCP of water resources allocation project in northern Hubei Province[J]. Yangtze River, 2018, 46(Sup1): 106-109. (in Chinese))

(收稿日期:2019-03-14　编辑:雷燕)

(上接第 42 页)

[3] 丛树铮. 水科学技术中的概率统计方法[M]. 北京:科学出版社,2010.

[4] Nelson R B. An introduction to copulas[M]. New York: Springer,2006.

[5] 周平. 干旱识别及干旱特征值频率分析研究[D]. 南京:河海大学,2014.

[6] 张世法. 洪水频率计算问题[D]. 南京:华东水利学院, 1965.

[7] H. A. 卡特维利施维利等著. 运筹学在水文水利计算中的应用[M]. 中国科学院力学研究所运筹室和中国科学院,水利电力部水力水电科学研究院水文研究所合译. 北京:科学出版社,1960.

[8] 刘光文. 水文分析与计算[M]. 北京:水利电力出版社, 1989.

[9] 芮孝芳. 关于设计洪水频率分析中几个问题的讨论. 水文学研究进展[M]. 南京:河海大学出版社,2007.

[10] 芮孝芳,张超. 论设计洪水计算[J]. 水利水电科技进展,2014,34(1):20-26. (RUI Xiaofang, ZHANG Chao. Research on design flood calculation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1):20-26. (in Chinese))

[11] 芮孝芳,陈洁云. 感潮河段设计洪水位的推求[J]. 水利水电技术,1995,26(11):39-42. (RUI Xiaofang, CHEN Jieyun. Estimation of design flood level of tidal channel [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1995,26(11):39-42. (in Chinese))

[12] 芮孝芳. 由流路长度分布律和坡度分布律确定地貌单位线[J]. 水科学进展,2003,14(5):602-606. (RUI Xiaofang. Study of determining geomorphologic unit hydrograph by means of probability denstity function of path length[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(5):602-606. (in Chinese))

[13] 芮孝芳. 流域汇流的概率论体系探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 135-139. (RUI Xiaofang. Study of mechanism of watershed concentration flow based on probability theory[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(2):135-139. (in Chinese))

[14] 芮孝芳. 随机产汇流理论[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(5): 8-12. (RUI Xiaofang. Random theory of runoff yield and flow concentration[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(5):8-12. (in Chinese))

[15] 王鸿. 潘家口水库入库径流量变化趋势研究[D]. 南京:河海大学,2009.

[16] SINGH K P, SINELAIR R A. Tow-distribution method for flood frequnce analysis [J]. Journal of Hydraulics Division, 1972, HY1:29-44.

(收稿日期:2019-06-19　编辑:骆超)