

纤维复合材料在调水工程长输管道中的应用*

代元, 徐洁, 丁瑶

(陕西工业职业技术学院, 陕西咸阳 712000)

摘要: 调水工程长距离输水管道的材料选择, 对工程成本和输水线路的安全有着重要影响。纤维复合材料具有轻质高强、内壁光滑、耐腐蚀性好等特点, 正逐步应用在输水管道中。文章分析了影响长距离输水管道材料选择的主要因素, 介绍了钢管、球墨铸铁管、混凝土管等传统输水管道的材料特性, 阐述了纤维复合材料在输水管道中的应用, 重点分析了玻璃钢夹砂管的发展和特点, 最后对纤维复合材料输水管道在产品升级、施工技术、安全防护和质量管理四个方面的发展进行了展望。

关键词: 调水工程; 长距离输水管道; 纤维复合材料; 玻璃钢夹砂管; 安全防护

中图分类号: TB 332; TV 672⁺²

The Application of Fiber Composite Materials in Long-distance Water Transmission Pipelines of Water Diversion Engineering

DAI Yuan, XU Jie, DING Yao

(Shaanxi Institute of Technology, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: The material selection of long-distance water transmission pipelines in water diversion engineering has a significant impact on project costs and the safety of water transmission lines. Fiber composite materials have the characteristics of lightweight, high strength, smooth inner wall, and good corrosion resistance, and are gradually being applied in water pipelines. This article analyzes the main factors that affect the selection of materials for long-distance water transmission pipelines, then reviews the material characteristics of traditional water pipelines such as steel pipes, ductile iron pipes, and concrete pipes. This article also elaborates on the application of fiber composite materials in water pipelines, with a focus on analyzing the development and characteristics of fiberglass reinforced plastic sand pipes. Finally, the development of fiber composite pipelines in four aspects: product upgrading, construction technology, safety protection, and quality management is discussed.

Key words: water diversion engineering; long-distance water transmission pipelines; fiber composite materials; fiberglass reinforced plastic sand pipes; safety protection

我国水资源总量位居世界第六, 但人均水资源低于世界平均水平, 且存在南多北少的时空分布不均特性, 水资源的短缺制约了我国部分地区的经济发展。因此, 调水工程成为平衡不同地区水资源的重要手段。自改革开放以来, 我国开发了南水北调工程、山东引黄济青、甘肃引大入秦等重要的调水工程, 完善了区域水资源配置体系, 在推动区域经济发展、促进社会安定团结和改善生态环境等方面发挥着重要作用。2023年国务院印发《国家水网建设规划纲要》, 将实施重大引调水工程建设列为了主要内容, 进一步推动了调水工程的发展。

调水工程中, 输水管道属于主要组成部分, 输送距离长, 因地势原因, 需下穿越河流、公路、铁路等, 在输送方式上常采用管道加压输水。长距离输水管道广泛应用于调水工程、城市水网工程中, 与其有关的研究属于当前的研究热点, 管材研究便是其中之一。桑亮^[1]对南水北调工程某输水线路的管径方案比选, 显示不论采用何种管径, 管材的成本占总费用的比重均高于60%。管道的材料选择是调水工程输水系统设计的一个要点问

题^[2], 不同管道材料, 其水力学特性、耐久性、安全性、经济性、施工难易等方面均有不同^[3-6], 同时越来越多的新型复合材料应用到输水管道中^[7], 选择更加丰富。因此, 分析影响长距离输水管道材料选择的主要因素, 梳理传统管道材料的特性, 研究纤维复合材料在长距离输水管道中的应用和发展趋势具有重要意义。

1 长距离输水管道材料选择主要因素

长距离输水管道是指输送原水、清水距离超过10km的输水管道, 根据其口径大小分为大(>500mm)、中(100~500mm)、小(<100mm)三类。调水工程需调配不同地区水资源, 输送流量大, 常采用大口径输水管道, 在选择时要综合考虑其技术性、经济性、环保性和耐久性。

1.1 技术性

输水管道的技术性是指具有较好的结构特性和水力特性, 运行时安全稳定, 是设计时考虑的重点内容。结

*基金项目: 陕西工业职业技术学院科研基金资助项目(项目编号: 2022YKYB-016)。

作者简介: 代元, 助教, 硕士研究生, 研究方向为水利水电工程水工建筑物。

构特性要求管道有良好的抗压性,能够承受内水压力、外压力、温度应力、重力荷载等各种管道荷载;水力特性要求管道内壁糙率较小,产生较少的水头损失,这两个特性都与管道材料有关。过去常采用金属管和钢筋混凝土管,随着新材料的发展,玻璃纤维增强塑料加砂管、钢带增强聚乙烯波纹管等新型复合材料越来越多地应用在输水管道中。对于长距离输水管道的材料选择,应根据地质条件、运行方式,充分论证管道的结构特性和水力特性,可采用不同口径、不同材质的组合方案。

1.2 经济性

经济性是指工程成本和效益的经济性对比,调水工程需进行国民经济评价分析项目的经济合理性。河南省南水北调工程配套输水管道的造价在输水工程总造价中占比高达40%,是构成工程成本的主要部分^[8]。管道造价则与管道材料、管道口径大小有关,进行输水管道设计时首先应确定管径,满足引水能力,再选择造价相对便宜的材料。另外,不同管材施工工艺和运输方式会影响投资成本,每种管道的使用寿命和维修成本则会影响到运行成本,在进行经济性比较时应同时考虑上述因素。

1.3 环保性

长距离输水管道选材时,环保性也是一个重要的考虑因素。自1998年以来,“以塑代钢”政策不断出台,国家进一步规范绿色建筑评价标准,推进可持续发展。传统的铸铁管、钢管等金属管道消耗自然资源,生产过程中排放大量废料和二氧化碳,与可持续发展理念相悖。随着科技发展,更多新型复合管材出现,其同时具备金属和非金属的特性,适用于各种复杂环境,可回收利用,对环境的影响较小。因此,长距离输水管道选材时,应遵循可持续发展原则,在同等条件下,优先选择更加节能环保的材料。

1.4 耐久性

耐久性指输水管道安装完成后能够长久地维持其使用功能,是一项综合指标,包括耐腐蚀性和抗老化性。输水管道穿越各种地形,露天管道长期受到酸性暴雨、阳光直射等各种气候侵蚀,埋地管道处于复杂地下环境中,可能遭受化学腐蚀、微生物腐蚀、电化学腐蚀。管道内部长期有水,并存微生物和杂质,会从内部腐蚀管道。一旦管道经腐蚀发生破坏,就需要耗费大量人力物力修复管道。管道的抗老化性表现在使用寿命的长短上,输水管道管线长,涉及区域广,若频繁更换管道,不仅费用多,还会造成输水线路施工期内无法使用。因此,长距离输水管道选材时应考虑材料的耐腐蚀性和抗老化性,选择耐久性优良的材料。

2 传统输水管道

2.1 金属管

钢管(SP)以钢铁为原材料,采用热轧工艺卷制而成,根据有无焊缝分为焊接钢管和无缝钢管。无缝钢管表面没有缝隙,可承受高温高压流体,但最大口径仅为1220mm,生产工艺复杂,造价相对较高。焊接钢管比无

缝钢管成本低、生产效率高,分为螺旋焊管和直缝焊管。螺旋焊管强度高于直缝焊管,可以生产管径较大的钢管,我国多个调水工程均有采用螺旋焊管。钢管强度高、可靠性高、耐高压,但其寿命较短,不耐腐蚀,长距离钢管管线不仅要外防腐涂层保护,还需要增加阴极保护系统。钢管连接时采用焊接方式,施工环境要求严格,工人技术对成品质量影响较大,焊缝处应力较弱,易发生爆管。

球墨铸铁管(DIP)是在铁水中加入球化剂,经过离心球墨铸铁机高速离心铸造成的管材,同时具有铁和钢的性能,强度高。与钢管相比,球墨铸铁管连接时采用柔性接口,抵抗地基不均匀沉降能力强,不会形成长线电流,所以无需增加阴极保护系统。另外,球墨铸铁管的防腐工作在工厂进行,有严格的标准,耐久性能及防腐性能好,寿命更长,现场施工时对工人的要求不高,接口安装速度快。球墨铸铁管过去采用水泥砂浆内防腐,糙率大,易结垢,近年来,国内厂家已相继开发聚氨酯、环氧陶瓷等特殊涂层的球墨铸铁管,无毒且内壁光滑,可以提高输水能力和水的安全性。但是球墨铸铁管价格高于钢管。

无论采用钢管还是球墨铸铁管作为输水管道,都因金属本身的强度和刚性承受较高的压力,技术性和耐久性好,在已建输水管道中占有比例最大,但是重量较大,运输、施工不方便,材料成本较高,造成较高的投资成本,经济性和环保性较差,钢材短缺的现状也促使人们开发新材料,用来替代传统的金属管道。

2.2 混凝土管

预应力混凝土管(PCP)指配置双向预应力钢丝的混凝土管,加工工艺简单,造价低,最大管径可达4.4m,但是体积重量大,运输安装不方便,抗渗性能较金属管差,内部的钢丝易腐蚀断裂,维修费用高,并且工作压力低于1.2MPa,性脆、怕碰撞,适用于中低压、中小口径的长距离输水管道。

预应力钢筒混凝土管(PCCP)由钢筒、钢丝和混凝土构成,具有钢材的抗拉和混凝土的抗压、耐腐蚀性能,相比PCP可以承受更高的压力,由于增加了钢筒,虽然造价比PCP高15%~20%,但仍然远低于金属管,抗渗性能大大提高,并且钢丝位于钢筒外层,被腐蚀断裂的风险减小。PCCP接头为钢制公差配合,滑动胶圈密封,安装方便,密封性好,经济寿命长,性价比高,广泛应用于长距离、大口径、高工压输水线路中。

混凝土管最大的优点是造价低,节省钢材,在一般领域可以替代钢管,但是单节重量大,安装时采用吊装,工作面宽度比钢管宽,受周边地形限制,不如钢管灵活。国内选用PCP的工程已较少,大多数选用PCCP,国内PCCP行业近年来进行了原材料、制作工艺、设备升级、管材防护等方面的技术改进,技术及质量控制水平已达到国际领先水平,并在不断优化。

2.3 塑料管

塑料管是以合成树脂为原材料,加入稳定剂、润滑剂、增塑剂等,在制管机内经挤压加工而成。塑料管质量轻,便于搬运、安装和维护,抗腐蚀性能良好,不受

水质影响,采用热熔连接,密封性好,适用于输送酸性或碱性介质,常规规格的塑料管单价低。调水工程中主要使用的塑料管为高密度聚乙烯管(HDPE),河北省南水北调配套工程就安装了43.931km的HDPE管,其他混凝土管道工程修复时也采用了非开挖内衬HDPE修复技术。与传统管材相比,HDPE管连接可靠,内壁光滑,耐化学腐蚀性好,不会滋生藻类、细菌或真菌,耐老化,使用寿命长,耐磨性好,还可以回收利用,总体来说其经济性、耐久性、环保性都更好,但是HDPE管工作压力在0.2~1.6 MPa之间,强度和刚度相对较低,并且接口安装质量受工人技术影响较大,需严格把握施工质量。HDPE管常规口径有成熟的生产线,而大口径HDPE管材因直径大、壁厚大而难于挤出成型,单价相对较高。目前HDPE管仍处于探索阶段,为提高其技术性,又发展出钢带增强聚乙烯螺旋波纹管、钢丝网骨架塑料合管(SRTP)等新型管材。

3 纤维复合材料在输水管道中的应用

3.1 纤维复合材料概述

纤维复合材料是由增强纤维和金属、陶瓷、聚合物等基体材料,经过缠绕、模压或拉挤等成型工艺而形成的复合材料。各类增强纤维提供刚度和强度,基体材料起配合作用,支持和固定增强纤维,传递纤维间的载荷,保护纤维,防止磨损或腐蚀。与传统的管材相比,纤维复合材料具有更强的灵活性,可以根据使用要求,调配纤维材料、基体材料的种类、比例和加工工艺,生产出综合性能不同的新材料,例如耐腐蚀、抗疲劳性、抗冲击性和减震阻尼性等。

3.2 纤维复合材料的应用

根据增强纤维的种类,将纤维复合材料分为碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料、芳纶纤维增强复合材料。在长距离输水系统中,常采用玻璃纤维增强复合材料,应用较多的是玻璃钢夹砂管(FRPM),是以玻璃纤维为增强材料,以不饱和聚酯树脂、环氧树脂等为基体材料,以无机非金属颗粒为填料,用往复式纤维缠绕工艺、连续式纤维缠绕工艺以及离心浇注工艺制备而成的管道。

玻璃钢夹砂管于1979年产于意大利,在欧洲及非洲应用较多,英国30%的供水管道采用了玻璃钢夹砂管,美国的玻璃钢管达16.5万km,日本也逐步将大、中口径的排水管道改为玻璃钢夹砂管。国内玻璃钢管的应用起步较晚,起源于1980年,经历了设备引进、材料技术改进,直到1999年才明确提出要推广玻璃钢管,截至目前,我国已有多个地区的引调水工程采用了玻璃钢夹砂管,具体见表1。

表1 国内已建玻璃钢夹砂管
Table 1 Domestic built glass sandwich pipes

项目名称	管道直径/mm	管道长度/km
塔城白杨河引水工程	1600/1100/900/600	119.679
吉木乃县扬水工程	1200	42.85
北海铁山港区供水工程	1000~1200	26.16
张峰水库	1200/800	32
山西坪上应急引水工程	1800/1400	81
胶州引黄济青工程	800	35
海水西送工程	1000~3200	618.46

与其他传统管道相比,玻璃钢夹砂管具有以下特点。

(1)重量轻、强度高、输水能力强。纤维复合材料相比于传统的金属管道,具有更轻的重量和更高的强度。玻璃钢夹砂管的重量仅为钢管的1/4左右,为PCCP的1/10左右,在轻量化的同时,仍可以承受0.4~2.5 MPa的水压力,应用范围广。玻璃钢夹砂管内壁光滑,糙率在0.009~0.01之间,输水能力强,可以在保证流量的情况下缩小管径,节省管材,降低造价,减小施工难度,在顶管施工中优势强于其他管材。

(2)耐腐蚀性和耐久性好。玻璃钢夹砂管采用的基体材料为环氧树脂或不饱和聚酯,该基体材料具有良好的稳定性,在腐蚀性环境中长期使用而不受影响,能有效抵抗酸、碱、盐等介质的侵蚀,管道内壁不结垢,具有良好的耐腐蚀性。与金属管道相比,不容易受到腐蚀、氧化或疲劳等问题的影响,降低了系统的维护成本,使用寿命长,可在-40~70℃温度范围内长期使用,耐久性好。

(3)设计性能好、运输安装便捷。纤维复合材料可以根据需要生产出各种规格和形状的管道,可制造出超大大口径玻璃钢管,方便了长距离输水系统的设计。此外,玻璃钢夹砂管重量轻,运输费低,安装时不需要大型机械,可采用承插内外胶合连接、橡胶圈承插连接等多种连接方式,安装便捷且密封性好。

(4)节能环保。纤维复合材料的制造过程中消耗的能源较少,相比于传统的金属管道制造过程具有较低的碳排放。此外,由于纤维复合材料具有较长的使用寿命,减少了管道的更换频率,降低了资源消耗和环境影响。

4 纤维复合材料输水管道的发展趋势

4.1 产品升级

纤维复合材料具有极强的性能可设计性,基体材料、助剂、增强纤维和生产工艺随着技术进步不断创新,可以选择适当的组分材料和调整增强纤维的取向,未来有望制造出质量更轻、强度更高、寿命更长、造价更低以及各方面性能更加优异的纤维复合管道。

4.2 施工技术

长距离输水线路中,根据设计要求可能采用了不同材料的管道,如何使两种材料连接可靠是一个施工技术难点。过去连接钢管与玻璃钢夹砂管时,常采用双“O”形密封圈承插连接,密封圈一旦老化、受损,就会变形,造成渗漏。有工程采用钢内套连接,用小口径钢筒插入玻璃钢夹砂管,用填料密实缝隙,再在接头处浇筑高强抗渗混凝土,无论管径是否一致都可以对接,但是接头施工时间较长。后来又设计出一种特制双相钢材质的转换头,一端与金属管道焊接,另一端与玻璃钢管道螺纹加胶粘结。随着纤维复合管道的发展,管道的施工连接技术也会持续改进。

4.3 安全防护

有压输水管道运行过程中,水流急速变化,产生水锤,此时管道内压力是正常压力的几十到上百倍,压力过高将引起管道破裂,压力过低则导致管道瘪塌,损坏

阀门和固定件,所以水锤防护是输水管道安全运行的重要措施之一。目前已有一些气压罐、减压阀、空气阀应用在输水管道中,但其具体的防护效果和适用条件未有验证。另一方面,输水管道不可避免要埋地敷设,周围土压及管内水压使管道产生应力变形,影响运行安全。有学者设计了应变片,用来监测玻璃钢夹砂管的环向应变,当超过安全值后,可以及时对该段管道进行维护,防止事故发生。未来,智能技术的发展将会应用到输水管道的安全防护上,更多的在线监测方法可以准确、快速地发出管道变形、渗漏、沉降等问题预警,保障输水系统安全运行。

4.4 质量管理

纤维复合材料管道的生产采用不同基体材料、不同增强纤维和不同生产工艺,若采用劣质原材料或生产工艺不标准,管道质量就不合格,安装好后达不到原有使用效果。深圳宝安大道玻璃钢管供水管线自2007年交付使用后曾多次爆管,原因就是采用了不合格的玻璃钢管材,而不是玻璃钢管不好。所以要想推广纤维复合管道,必须建立健全的产品质量管理体系,纤维复合管道的生产方、使用方以及政府要做好各自的检验和监督管理工作,也可以利用第三方检测机构加强产品质量检测。

5 结语

我国近年来加快构建国家水网主骨架和大动脉,管道需求量大,管材选择时要根据工程的地质条件、设计要求等具体情况,从技术性、经济性、环保性和耐久性

方面综合考虑,选择合适的管材,同时可以采用更加灵活的组合方案。纤维复合材料可以提供轻质、高强度、抗腐蚀和耐久性能,具有便捷的施工和安装特点,更加节能环保,在调水工程长距离输水系统中的应用具有重要优势。随着技术进步,纤维复合管道在产品升级、施工技术、安全防护和质量管理等方面也将更加完善。

参考文献

- [1] 桑亮. 输水管道管材及管径选择浅析 [J]. 陕西水利, 2019(09):190-192.
- [2] 唐帅, 邢飞, 赵志鹏. 某供水工程输水管道设计 [J]. 水利技术监督, 2023(01): 282-284,293.
- [3] 张震. 汾阳市域供水管线管材选择和工程布置 [J]. 山西水利, 2023(04): 39-40,56.
- [4] 丁科文. 长距离大流量输水工程的管材选用研究 [J]. 陕西水利, 2023(04): 93-95.
- [5] 罗靖. 惠州市东江引水一期长距离输水管道工程管材优化比选分析 [J]. 工程技术研究, 2022,7(23): 107-109.
- [6] 张龙. 甘河子河灌区输水管道工程管材比选分析 [J]. 水利技术监督, 2022 (05): 162-164,223.
- [7] 柳素霞. 碳纤维复合材料加固技术在给排水管道修复补强中的应用 [J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52 (01): 138-140.
- [8] 马俊青, 鞠厚磊. 南水北调配套工程输水管道设计中问题的探讨 [J]. 河南水利与南水北调, 2011(07): 34-36.

(上接第38页)

- [13] 赵朗朗, 张勤, 唐军, 等. 核用陶瓷光固化3D打印工艺及抗震性能研究 [J]. 原子能科学技术, 2023, 57(S1):139-147.
- [14] 黄兆权, 黄瑶, 姜知水. MgO-Y₂O₃ 烧结助剂对光固化成形 Si₃N₄ 陶瓷显微结构及性能的影响 [J]. 机电信息, 2023(8):48-51.
- [15] 许西庆, 杨永康, 李杰, 等. 空心叶片铸造用陶瓷型芯的3D打印及性能调控研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2023,51(6):1583-1594.
- [16] 周远恒, 陈才俊, 葛军显, 等. 氧化锆全瓷冠光固化3D打印研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2023,42(6):2150-2160.
- [17] 郑江涛, 张航, 王胜佳, 等. ZTA陶瓷光固化3D打印参数设计及性能增强研究 [J]. 中国陶瓷, 2023,59 (5):43-49.
- [18] 申发磊, 殷凤仕, 李星晨, 等. 基于光固化技术增材制造陶瓷和金属的研究进展 [J]. 材料导报, 2023,37 (12):81-90.

《合成材料老化与应用》杂志投稿邮箱: hccllhyyy@163.com

欢迎 QQ:441438064 在线投稿