

预应力钢筒混凝土管保护层砂浆性能研究进展*

罗纬邦¹, 吉富娜², 陆云才¹, 马财龙^{2†}, 周丽娜²

(1. 新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 随着跨区域调水工程的持续推进, 预应力钢筒混凝土管(Prestressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP)被广泛应用。在盐渍土环境中, PCCP管道长期受土壤中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的侵蚀, 使其外附砂浆损伤开裂、内部钢丝锈蚀, 造成PCCP爆管事件屡有发生, 故探究不同因素对PCCP保护层砂浆基本性能的影响规律, 并提出抗侵蚀性能提升方法, 对工程实践具有重要意义。本文梳理了PCCP保护层砂浆的性能要求和影响因素, 并总结了PCCP保护层砂浆抗侵蚀性能的改善方法。已有研究表明: PCCP保护层砂浆的配合比、制作工艺与养护条件均对其力学性能、吸水率和抗侵蚀性能有较大的影响。在PCCP砂浆中掺入矿物掺合料和砂浆密实剂等外加剂可以有效提高砂浆的密实度, 在PCCP砂浆保护层表面涂防腐涂层可以有效阻止外界侵蚀离子的侵入, 从而提高PCCP管道的耐久性和使用寿命。

关键词: PCCP保护层砂浆; 抗压强度; 吸水率; 密实度; 防腐涂层

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.06.05.0001

中图分类号: TV432 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)05-0581-013

引文格式: 罗纬邦, 吉富娜, 陆云才, 马财龙, 周丽娜. 预应力钢筒混凝土管保护层砂浆性能研究进展[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(5): 581-593.

英文引文格式: LUO Weibang, JI Funa, LU Yuncai, MA Cailong, ZHOU Lina. Research progress on the performance of protective layer mortar for prestressed steel cylinder concrete pipes[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(5): 581-593.

Research Progress on the Performance of Protective Layer Mortar for Prestressed Steel Cylinder Concrete Pipes

LUO Weibang¹, JI Funa², LU Yuncai¹, MA Cailong², ZHOU Lina²

(1. Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co. Ltd., Urumqi Xinjiang 830047, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

Abstract: With the continuous promotion of cross-regional water transfer projects, prestressed steel cylinder concrete pipe (Prestressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP) has been widely used. However, due to the long-term erosion of Cl^- and SO_4^{2-} in the soil, the external mortar expansion and cracking, internal steel wire corrosion, resulting in PCCP bursting have occurred repeatedly, so it is important to explore the different factors on the basic performance of the PCCP protective layer mortar, and erosion resistance of the law and to improve the anti-erosion performance of the PCCP protective layer mortar have important practical significance of the project. In this paper, the performance requirements and influencing factors of PCCP protective layer mortar are sorted out, and the improvement methods of erosion resistance of PCCP protective layer mortar are summarized. The results of the study show that the PCCP protective layer mortar mixing ratio, production process and maintenance conditions have a greater impact on its mechanical properties, water absorption and erosion resistance. In the PCCP mortar mixed with mineral admixture and mortar compacting agents and other additives can effectively improve the compactness of the mortar. Anti-corrosion coating on the surface of PCCP mortar protection layer can effectively prevent the intrusion of external erosion ions, thus improving the durability and service life of PCCP pipelines.

* 收稿日期: 2025-06-05

基金项目: 中华人民共和国水利部2022年重大科技项目“新疆高盐渍复杂侵蚀环境预应力钢筒混凝土管耐久性研究”(SKS-2022111); 红山科创英才-青年拔尖人才项目“复杂环境大口径长距离PCCP输水管道运行安全保障关键技术研究”(B241013003).

作者简介: 罗纬邦(1965—), 男, 教授级高工, 主要从事水利水电工程设计的研究, E-mail: lwblwb@qq.com.

† 通讯作者: 马财龙(1986—), 男, 教授, 主要从事混凝土结构损伤演化与控制的研究, E-mail: macailong@xju.edu.cn.

Key words: PCCP protective layer mortar; compressive strength; water absorption; compactness; anti-corrosion coating

0 引言

预应力钢筒混凝土管(Prestressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP)是由混凝土管芯、钢筒、预应力钢丝、钢制承插口接头、砂浆保护层组合而成的大口径复合型管材,具有抗压抗拉性能强、耐腐蚀、易密封、防渗性能好等特点^[1],被广泛用于输水干线、城市排污、农业灌溉、工业输水等领域,逐渐成为跨区域水源地之间输水工程首选环保型非金属复合管材.随着我国城市化的不断发展,水利事业蒸蒸日上,截至2019年,我国PCCP的生产与使用规模均居世界第一^[2].三十年来,我国应用PCCP的重大工程如表1所示^[3].

表 1 我国PCCP应用重大工程^[3]

工程名称	长度/km	口径/m	压力/MPa	建成时间
山西万家寨引黄工程	138.60	3.0	0.6~1.0	2002年
哈尔滨磨盘山供水工程	135.00	2.2	1.0	2006年
南水北调中线京石段应急供水工程	110.00	4.0	0.8	2007年
广州西江引水工程	51.60	3.6	0.6	2010年
山西万家寨入晋北干线工程	115.75	2.0~3.2	0.4~0.8	2011年
鄂北水资源配置工程	269.67	3.8	0.6	2015年
内蒙古引绰济辽工程	206.00	2.8/3.2	0.6	2018年
广东环北部湾水资源配置工程	65.00	2.8/3.0	0.4~1.0	2023年

随着PCCP的广泛应用,爆管事件时常发生.据调查结果显示,自20世纪40年代到2006年,美国生产使用30 000 km PCCP管道,共发生435次爆管事件^[4];墨西哥、北非等也出现多起PCCP爆管事件,利比亚的“大人工河”工程和摩洛哥的“塔菲拉莱特”供水工程自投入使用以来,管道因Cl⁻侵蚀发生多次失效性爆管事件^[5-7].我国使用PCCP以来,也发生多次爆管事件^[8-9].由上述爆管事件可知,PCCP失效的主要原因是:保护层砂浆出现裂缝或空鼓后,环境中Cl⁻通过保护层渗透至预应力钢丝表面,导致钢丝锈蚀断裂,最终引发爆管.

PCCP保护层砂浆是管道的关键组成部分,更是管道结构的第一道防线,承担核心防护功能——保护预应力钢丝免受外界侵蚀损坏,既保障管道结构安全稳定,也直接影响使用寿命与安全性.由于PCCP管道通常埋设在地下,长期受水质、土壤化学物质等环境因素的影响,尤其在新疆地区,土地盐渍化问题突出^[10],土壤及地下水含Cl⁻和SO₄²⁻浓度较高,恶劣的服役环境对PCCP保护层砂浆造成较大影响,从而对PCCP的使用安全带来隐患.因此,研究优化PCCP保护层砂浆的性能,提高其耐久性、抗渗性等关键指标,对保证PCCP管道安全运行、延长管道使用寿命具有重要价值.本文对PCCP保护层砂浆性能要求及试验方法进行归纳,简述PCCP保护层砂浆性能的影响因素,总结了改善PCCP保护层砂浆抗侵蚀性能的措施.

1 PCCP保护层砂浆性能要求和测试方法

为保证PCCP安全稳定运行,达到设计使用年限,减小失效性事件发生的概率,中美规范均对PCCP保护层砂浆原材料、配合比、力学性能等作出了严格规定.1949年,美国颁布了第一部关于PCCP的技术规范ANSI/AWWA C301,主要对PCCP管道的制作、生产、运输等进行了规定,此后多次修订;2014年,美国供水协会发布规范ANSI/AWWA C301—14^[11],成为最新的生产规范,其规定砂浆配合比按质量计算,由1份波特兰水泥和不超过3份细骨料组成,这也限定了PCCP保护层砂浆的砂灰比不得大于3,美国颁布的ANSI/AWWA C302—22^[12]规范中也有同样的规定.此外,ANSI/AWWA C301—14中还规定了PCCP保护层砂浆的最小厚度、含水率、吸水率以及抗压强度等指标.

国内关于PCCP设计、生产的规范颁布较晚,2015年以前,我国PCCP设计和生产参照国外规范;2015年我国首次颁布了《预应力钢筒混凝土管》(GB/T 19685—2015),从此,PCCP生产设计有了国内的参考标准.2017年,将上述规范更新为《预应力钢筒混凝土管》(GB/T 19685—2017)^[13].我国规范也对PCCP保护层砂浆的最小

厚度、含水率、吸水率以及抗压强度等进行了相关规定.关于保护层砂浆的部分指标,将国内外规范的要求作如下对比(表2).

表 2 PCCP保护层砂浆国内外规范对比

序号	控制指标	ANSI/AWWA C301—14 ^[11]	GB/T 19685—2017 ^[13]
1	保护层厚度/mm	≥19	≥25
2	新拌砂浆含水率/%	≥7	≥7.5
3	抗压强度/MPa	25×25×25(立方体强度乘以0.8 换算为等效圆柱体强度)	25×25×25
	试件尺寸/mm		
4	28 d抗压强度/MPa	≥37.9	≥45
	28 d吸水率		
	最大值/%	≤10	≤10
	平均值/%	≤9	≤9

针对测试PCCP保护层砂浆性能指标,我国规范《混凝土输水管试验方法》(GB/T 15345—2003)增加了保护层砂浆的强度试验方法以及吸水率的测试方法,砂浆强度的测试方法规定为切割法,砂浆吸水率的测试方法规定为沸煮法.《混凝土输水管试验方法》(GB/T 15345—2017)^[14]进一步说明保护层砂浆强度以及吸水率的测定方法,新规范借鉴了美国ANSI/AWWA C301—14中关于沸煮法测定吸水率的相关内容,但更加详细.

2 PCCP保护层砂浆试验方法

PCCP保护层砂浆属于干硬性砂浆,状态干散,黏聚性较低,在实际工程中通常使用辊射法制作.少数学者在实验室研究PCCP保护层砂浆时,采用与工程一致的辊射法;当实验室不具备辊射条件时,常采用压力成型和微调水胶比的方法进行研究.

2.1 辊射法

辊射法通过辊射轮对砂浆的辊压作用及高速旋转产生的离心作用,将砂浆喷射至PCCP管道表面,最终形成致密的砂浆保护层.1984年,我国引进辊射工艺和设备,此后该方法在我国快速推广.引进辊射工艺之前,PCCP保护层砂浆制作常采用喷浆法,周燕^[15]阐述了辊射法制作PCCP保护层砂浆的原理,并对喷浆法和辊射法进行了对比,两种工艺的特点如表3所示,在保护层质量、材料利用以及环保方面,辊射法均优于喷浆法.

表 3 PCCP保护层砂浆成型方式对比^[15]

项目	喷浆法	辊射法
保护层质量	易造成干灰包、凹孔、 裂纹、空鼓、脱落现象	均匀、致密、附着力强, 无脱落、空鼓、干包现象
物料回弹率	>40%	<24%
工作环境	粉尘浓度严重超标	无飞尘
生产效率	高	较高

张永鸿^[16]对辊射法制作预应力钢筒混凝土管保护层砂浆的参数选择、经济性和使用效果进行了分析,发现辊射法制作的保护层砂浆具有理想的质量和良好的经济效益.此外,近年大部分学者研究PCCP保护层砂浆都采用辊射法制作^[17-21],将砂浆通过辊射机辊射到钢板上,经过24 h脱模再开展后续研究,辊射法制作的砂浆质量、受力等方面更贴合工程实际,研究结果更具可信性.

辊射成型的主要局限性在于管身厚度不均(尤其是管端易偏薄)、砂浆反弹导致材料浪费、层间结合不良与密实度不足风险较高、管端复杂区域需大量人工修补、表面粗糙,且工艺对原材料性能和环境条件敏感,影响保护层的均匀性和耐久性.

2.2 压力成型法

在室内开展PCCP保护层砂浆性能研究与检测时,受辊射设备体积较大及实验室场地空间有限的影响,辊射成型方式难以实现.因此,部分学者研究室内成型方式.王冬等^[17-18]开发了PCCP砂浆室内压力成型的新方

法,对比施加不同压力成型与辊射成型制作的砂浆抗压强度和吸水率(图1),当持荷压力为13 MPa、持荷时间为20 s时,压力成型的砂浆抗压强度和吸水率均满足要求,且与辊射法制作的砂浆性能最接近.图2为压力成型砂浆拆模密度与砂浆抗压强度和吸水率的关系,砂浆28 d抗压强度随拆模密度的增加而增加,28 d吸水率随拆模密度的增加而减小.综合来看,当砂浆拆模密度大于 $2\ 175\text{ kg/m}^3$ 时,砂浆的抗压强度和吸水率均满足要求.由此可知,室内成型砂浆与实际工程砂浆基本性能较接近,能够通过压力成型试验在室内进行研究和判定.

压力成型的主要局限性在于设备与模具成本极高、规格适配性差(需定制模具且换型困难)、生产效率较低(工序复杂且依赖模具周转),同时工艺控制苛刻(需精确填充干硬性砂浆并面临溢浆浪费),管端区域仍需人工修补,且高压环境可能削弱砂浆界面结合强度或扰动钢丝,使其仅适用于大批量标准化生产场景.

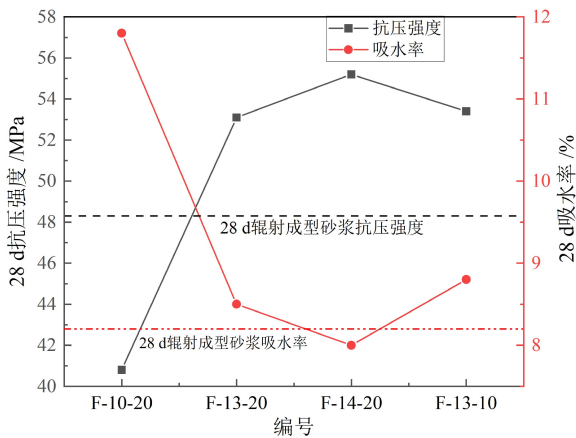


图 1 压力成型砂浆抗压强度和吸水率的变化规律^[17]

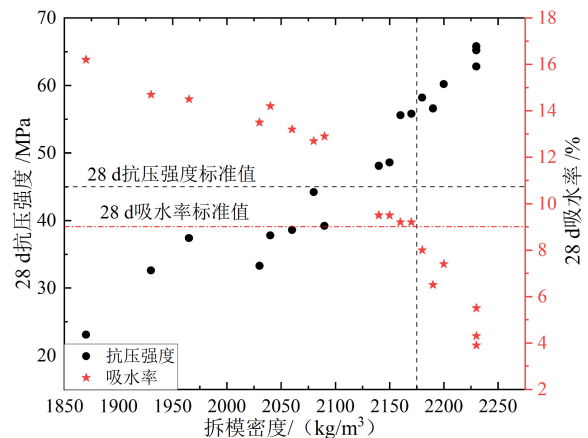


图 2 砂浆拆模密度与抗压强度和吸水率的关系^[18]

注: F-a-b表示持荷压力为a MPa、持荷时间为b s

2.3 微调水胶比法

Berrami等^[22]、Hassi等^[23]、Ejbouh等^[24]、王浩等^[25]在研究PCCP保护层砂浆时分别将水胶比适当增大到0.35和0.38,以实现砂浆成型,且密实度得到一定保证.但尚未针对增大水胶比后砂浆内部孔隙结构与辊射成型砂浆差异性开展研究,也未对两者在抗压强度、吸水率等基本性能上的相似度进行对比分析,故微调水胶比法与实际工程是否相符存在质疑,还需开展更全面系统的探究.综上所述,目前室内砂浆成型局限于以上3种方法,如表4所示,辊射法和压力成型法的可实现性较低,微调水胶比法的准确性存在质疑,故室内试验方法还需进一步优化,向更高效、更简便、更准确的方向改进.

表 4 不同试验方法的优缺点

序号	试验方法	优点	缺点
1	辊射法	与实际相符,准确性高	设备过大,不可在实验室开展,经济性差
2	压力成型法	可在实验室开展,操作方便	效率低,模具易变形
3	微调水胶比法	操作简单,效率高	与实际工程的相关性存在质疑,准确性低

3 PCCP保护层砂浆基本性能影响因素

PCCP相关规范中主要对PCCP保护层砂浆28 d抗压强度和28 d吸水率进行了规定,基于此,国内外学者对PCCP保护层砂浆抗压强度和吸水率的影响因素开展了诸多研究,部分学者也对PCCP保护层砂浆的渗透性进行了分析.

3.1 砂浆配合比

研究发现,砂浆的砂灰比不仅与砂浆的密实度直接相关,且对砂浆强度也有较大影响.砂子用量的增加提供了断裂时的闭合压力^[19].PCCP相关规范规定了保护层砂浆的砂灰比不大于3,但未规定具体数值,故王

坤^[20]、阙小平等^[21]就砂灰比对PCCP保护层砂浆的基本性能的影响进行了研究,得到砂灰比对砂浆抗压强度和吸水率的影响规律.图3为砂浆抗压强度与砂灰比之间的关系,砂浆的抗压强度随砂灰比增大逐渐降低,当砂灰比为2.2~2.6时,砂浆28 d抗压强度均大于45 MPa,满足要求.图4为砂浆吸水率与砂灰比之间的关系,王坤^[20]认为砂浆吸水率随砂灰比的增大先降低后升高,将砂灰比2.4视为转折点;而阙小平等^[21]认为砂浆吸水率随砂灰比的增大逐渐降低,在研究中并未出现转折点.二者结论存在差异,可能源于辊射设备参数不统一、砂浆水胶比略有不同等影响.

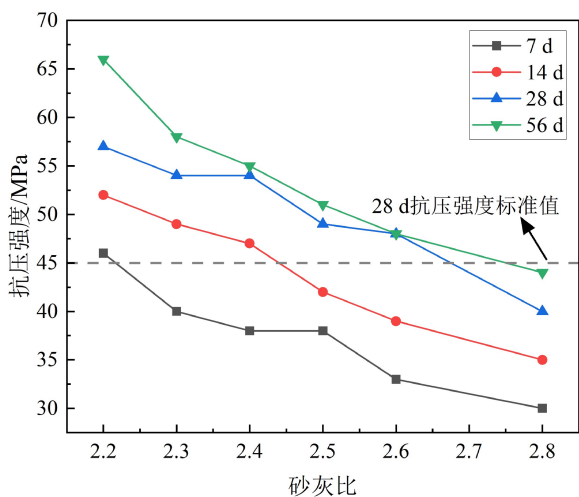


图3 砂浆抗压强度与砂灰比的关系^[20]

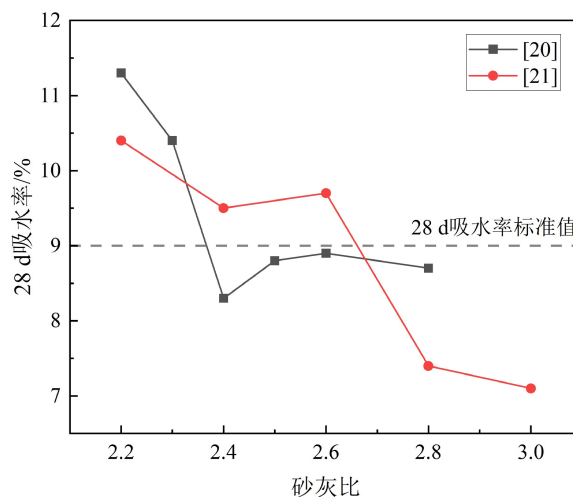


图4 砂浆吸水率与砂灰比的关系^[20-21]

PCCP保护层砂浆的砂灰比对其基本性能具有显著影响.当砂灰比过大(即水泥用量偏小)时,骨料间空隙难以充分填充,致使砂浆密实度不足,进而降低其抗压强度;当砂灰比过小时,骨料间空隙被水泥浆体填满,而水泥在水化过程中因自身收缩作用,易在骨料界面处产生微裂纹,最终导致砂浆力学性能降低.无论是水泥用量过大还是过小,均会降低保护层砂浆的密实度,进而对其吸水率产生影响.综合抗压强度和吸水率指标,PCCP保护层砂浆的砂灰比在2.4~2.8之间较为合适.

此外,新拌砂浆的含水率对PCCP保护层砂浆的性能也有较大影响^[25].随含水率的增加,PCCP保护层砂浆的抗压强度不断增大,吸水率逐渐降低.当新拌砂浆的含水率过低时,砂浆中水泥浆体较少,砂浆整体的黏聚性较差,辊射到PCCP管道表面时易形成疏松多孔的砂浆保护层^[26],且由于含水率低,水泥水化作用不充分,导致砂浆的抗压强度偏低、吸水率偏高,故要适当增大新拌砂浆的含水率以满足砂浆性能要求.

综合现有研究成果可知,不同学者所得PCCP保护层砂浆的最优砂灰比范围存在一定偏差;与此同时,针对含水率与该砂浆性能间关系的研究尚不够系统,且未涉及水胶比对其性能的影响.在后续研究中,仍需开展全面且系统的探究,将砂灰比与水胶比纳入统一研究框架进行综合分析.

3.2 辊射工艺

辊射法制作PCCP保护层砂浆是目前最常用的方法,然而辊射设备参数设置对砂浆的质量有显著影响.周燕^[15]对影响PCCP保护层砂浆性能的工作参数进行了研究,并说明如何选择参数.王坤^[20]、阙小平等^[21]研究了不同辊射状态和辊射参数对PCCP保护层砂浆抗压强度、吸水率的影响规律.图5为不同辊射状态与辊射距离对砂浆抗压强度的影响规律,当辊射轮状态相同时,砂浆的抗压强度随辊射距离的增加而减小,当辊射距离为30 cm和40 cm时,内嵌(NQ)和相切(XQ)两种状态下砂浆抗压强度相当,且远大于相离(XL)状态下的抗压强度;当辊射距离为50 cm时,砂浆抗压强度为NQ>XQ>XL,且均低于45 MPa.图6为不同辊射状态与辊射距离对砂浆吸水率的影响规律,在相同辊射轮状态下,砂浆吸水率随辊射距离的增加而增大;当辊射距离相等时,砂浆吸水率随咬合状态的松弛而增大.

砂浆从辊射轮弹射出的瞬间具有初始动能,在运动到PCCP管道的过程中,由于空气阻力的存在,动能会产生损失,故随辊射距离的增大,附着在PCCP管道上的砂浆越松散、黏聚力越小,从而导致砂浆具有更低的强度和更高的吸水率,而辊射轮咬合松紧决定了砂浆初始动能的大小,咬合越紧,初始动能越大,砂浆密实度越

高. 综合砂浆抗压强度和吸水率指标, 当两轮相切、辊射距离为40 cm时, 砂浆性能最好.

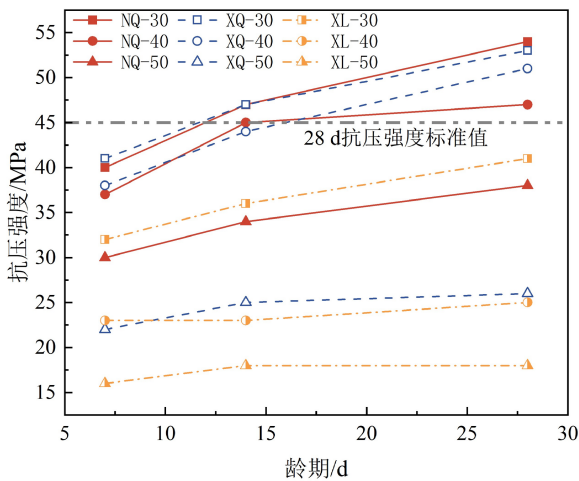


图5 不同辊射状态下砂浆抗压强度变化规律^[20]

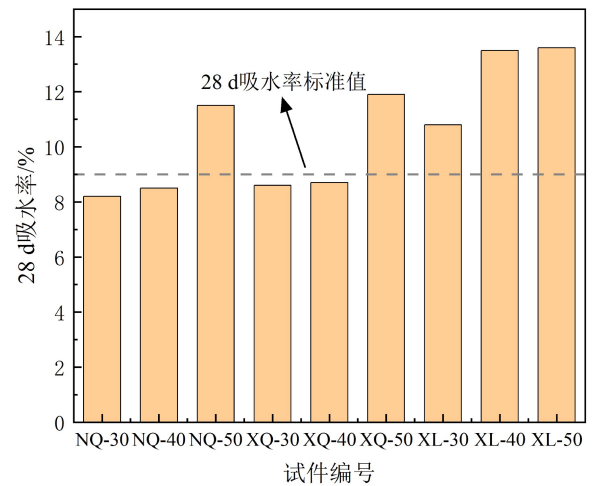


图6 不同辊射状态下砂浆吸水率变化规律^[20]

图7为辊射参数对抗压强度的影响, 砂浆的抗压强度随辊射机运行速度提高先增大后减小. 图8为辊射参数对吸水率的影响, 阙小平等^[21]发现PCCP保护层砂浆的吸水率与辊射设备的速度有关, 认为砂浆吸水率随辊射机运行速度提升先降低后增大; 王坤^[20]认为砂浆吸水率在中高速时最小, 而阙小平等^[21]认为砂浆吸水率在低速时为转折点. 二者结论存在差异, 可能源于设计的砂浆配合比不同, 使用的辊射机功率有差异.

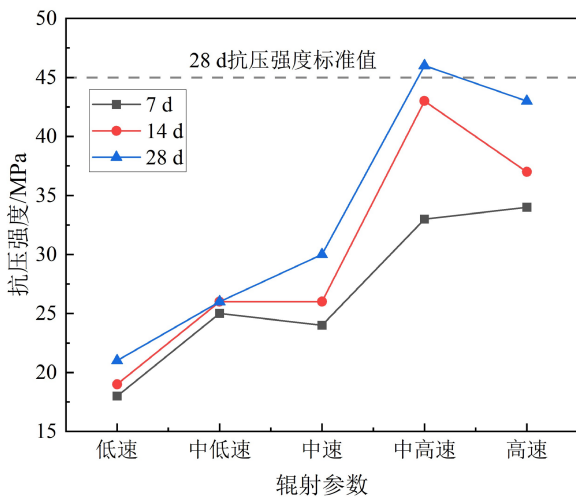


图7 不同辊射参数下砂浆抗压强度变化规律^[20]

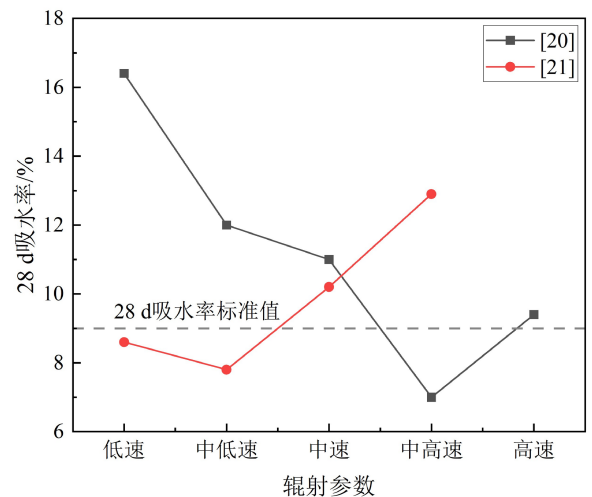


图8 不同辊射参数下砂浆吸水率变化规律^[20-21]

虽然上述研究中转折点速度有所差异, 但变化趋势是统一的, 由此可知, 速度过低或过高均对保护层砂浆性能产生不利影响. 辊射机运行速度过低会造成辊射砂浆初始速度较低, 导致形成的砂浆保护层较松散、密实度欠缺, 而辊射机运行速度过高容易使辊射到PCCP管道上的砂浆回弹较多, 对质量产生不利影响. 针对当前最优辊射速度研究结论不一致的问题, 后续研究需结合砂灰比、含水率两个关键参数开展系统分析, 同时还需对辊射机功率对砂浆性能的影响进行全面评估.

3.3 养护方式

PCCP管道的养护质量对其性能和使用寿命起关键作用. PCCP管道制作完成后, 可以采用蒸汽养护、标准养护和洒水养护的方式, 不同养护方式对PCCP保护层砂浆及管芯混凝土的性能影响不同. 研究表明, 蒸汽养护可以促进水泥早期水化, 显著提高混凝土的早期强度, 缩短施工周期^[27]. 图9为不同养护条件下混凝土抗压强度随龄期增长的变化规律^[28-30], 与标准养护相比, 蒸汽养护显著提高了混凝土早期强度, 14 d后的强度比标

准养护略低. 山西万家寨引黄工程在采用蒸汽养护PCCP管道后^[31], 通过试验对蒸汽养护制度进行了分析和评估, 发现蒸汽养护下混凝土28 d强度与标准养护没有明显差异, 甚至蒸汽养护条件下的混凝土强度略高.

张志国^[29]、汪冬冬等^[31]、陈富廉^[32]、Hu等^[33]研究了蒸汽养护和标准养护对氯离子扩散系数的影响, 如图10所示, 养护28 d后, 蒸汽养护的氯离子扩散系数均大于标准养护. 不同的是, Hu等^[33]对PCCP保护层砂浆在不同养护条件下早期氯离子扩散系数进行了研究, 发现与标准养护相比, 蒸汽养护14 d前氯离子扩散系数较小, 14 d后氯离子扩散系数明显大于标准养护, 且蒸汽养护14 d后氯离子扩散系数下降幅度很小.

由此可知, 蒸汽养护可以促进水泥早期水化, 水化产物填充孔隙, 使得水泥基材料更加密实, 对提高砂浆早期密实度和抗压强度产生非常有利的效果, 但不利于后期性能的发展, 养护龄期超过14 d后, 标准养护对砂浆密实度的贡献明显高于蒸汽养护.

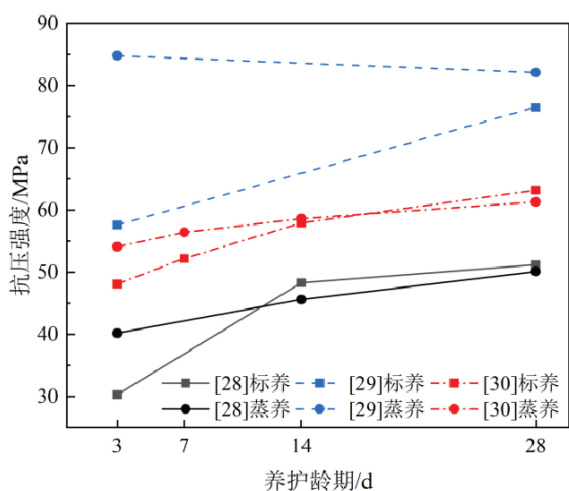


图 9 不同养护条件下抗压强度变化规律^[28-30]

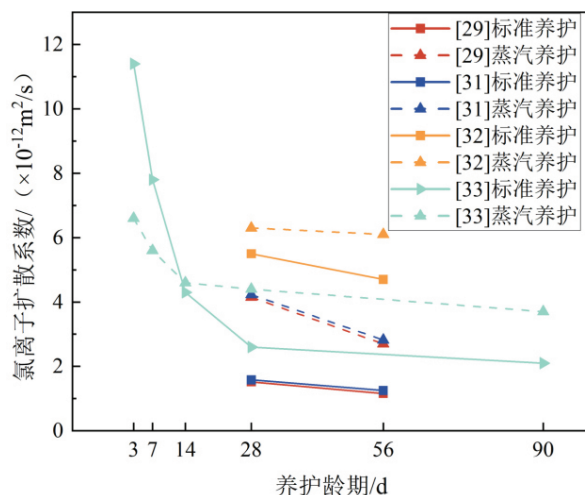


图 10 不同养护条件对氯离子扩散系数的影响规律^[29,31-33]

然而在实际工程中, 由于PCCP管道体积庞大且批量生产, 采用蒸汽养护和标准养护在空间和成本方面都存在局限, 两种养护条件均难以实现, 大部分采用洒水自然养护. 基于此, 在养护方式方面还需开展更多研究, 探究洒水自然养护与蒸汽养护、标准养护之间的差异性. 综上所述, PCCP保护层砂浆的砂灰比、含水率、制作工艺和养护制度均对砂浆的力学性能、内部结构和渗透性能有较大影响, 故在制作PCCP时应严格按照规范选用原材料, 选取合适的配合比和辊射机参数, 制作完成PCCP后对其进行规范养护, 确保PCCP在制作方面不存在潜在的风险, 为PCCP达到规定寿命奠定良好基础.

4 改善PCCP保护层砂浆抗侵蚀性能措施

PCCP发生失效性破坏主要是由于服役环境中的有害离子通过保护层砂浆到达预应力钢丝表面, 腐蚀预应力钢丝, 使得预应力钢丝断裂, 从而导致爆管. 故改善PCCP保护层砂浆的抗侵蚀性能至关重要, 对此国内外大量学者开展了相应研究. PCCP保护层砂浆的改进可以通过矿物掺合料、化学外加剂和外涂防腐涂层来实现^[34], 矿物掺合料和化学外加剂可用于降低保护层砂浆的孔隙率和渗透性, 从而延缓离子侵入的进程; 外涂防腐涂层可以阻断离子侵入的通道, 保护砂浆免受外界环境中离子的侵蚀.

4.1 提高密实度

PCCP保护层砂浆的抗侵蚀性能与其自身密实度息息相关, 侵蚀性离子通过保护层砂浆的孔隙到达预应力钢丝表面, 故提高保护层砂浆的密实度可以有效减少有害离子的侵入, 降低PCCP失效风险. 矿物掺合料颗粒较细, 有较高的火山灰反应, 是提高水泥基材料密实度的优选材料.

Berrami等^[22]、Hassi等^[23]研究了暴露在模拟侵蚀土壤中掺粉煤灰PCCP保护层砂浆的性能, 在砂浆圆柱体中预埋钢筋, 对钢筋进行电化学检测, 发现对照组的腐蚀电位快速下降至腐蚀概率大于90%的区域, 而粉煤灰砂浆的电位稳定在腐蚀电位小于10%的区域. 图11为砂浆电阻随侵蚀循环次数增加的变化规律, 与对照组相比, 掺粉煤灰砂浆中的钢筋电阻明显增大. Ejbouh等^[24]通过电化学阻抗谱分析了粉煤灰和硅灰对PCCP保护层砂浆

耐久性能的影响,发现掺入粉煤灰和硅灰的砂浆密实度得到改善,添加10%粉煤灰和10%硅灰均可降低PCCP砂浆在 Cl^- 和 Cl^- - SO_4^{2-} 复合侵蚀下的孔隙率,提高砂浆的抗 Cl^- 迁移性能,且粉煤灰对孔隙率的改善效果更好、阻抗更低,但硅灰对PCCP砂浆力学性能改善更好.

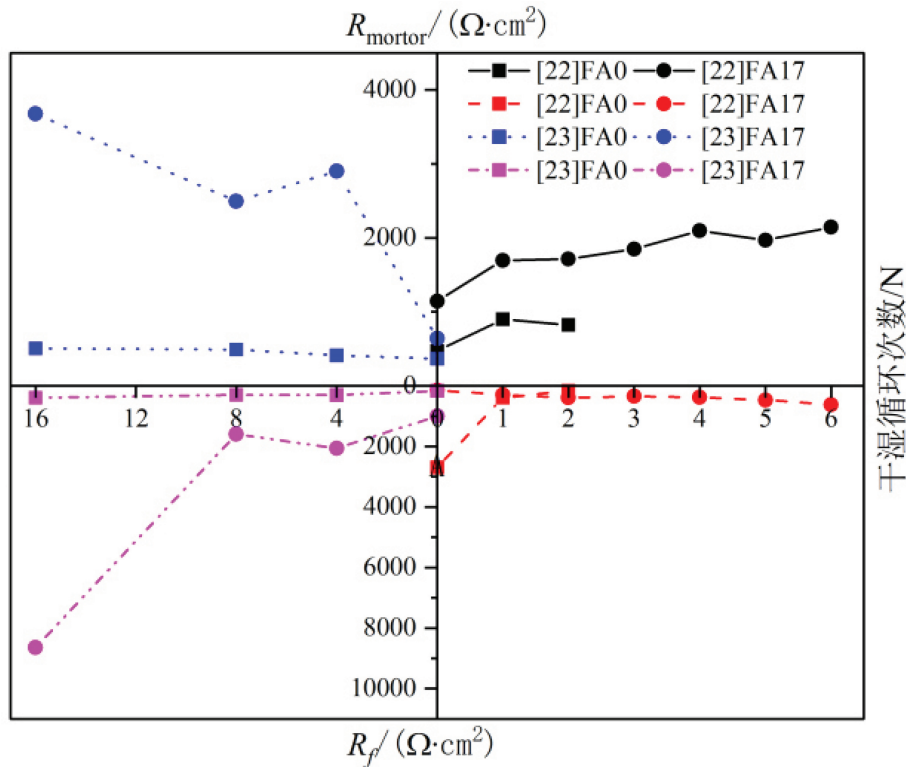


图 11 电阻随干湿循环次数的变化规律^[22-23]

粉煤灰和硅灰掺合料的使用不仅发挥了火山灰效应,使得砂浆密实度增加,还通过增加电阻来阻止离子转移,从而降低 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的渗透,提高PCCP保护层砂浆的使用寿命.

王冬等^[35]研究了砂浆密实剂(Density Strength Factor, DSF)掺量对PCCP保护层砂浆流动度、力学性能和耐久性的影响,发现掺入砂浆密实剂对砂浆的流动度与力学性能无不利影响.掺入15% DSF后,保护层砂浆28 d吸水率降低66.7%, Cl^- 扩散系数和渗水高度均降至0,28 d干缩率降低22.4%,明显提高了保护层砂浆的抗渗、抗裂、抗侵蚀及黏结强度等耐久性能.阙小平等^[21]在研究PCCP保护层砂浆吸水率的影响因素时,在砂浆中添加防水剂进行试验,发现掺入防水剂的砂浆平均吸水率较未掺入防水剂降低3.8%.砂浆防水剂与水泥可以发生水化反应,生成较细的结晶体,填充和密封砂浆内部的毛细孔和微裂缝,使砂浆更加致密,从而有效降低吸水率,提高力学性能和抗侵蚀性能.近年来,随着材料科学的发展,我国研制了聚合物改性水泥砂浆,常见的有丙乳砂浆、FC-01和RP-W系列防腐砂浆等,聚合物以乳液形式掺入水泥砂浆中,可有效提高砂浆的密实度和黏聚性,减弱有害离子的侵蚀,但聚合物水泥砂浆不耐酸,不宜用在强酸腐蚀性环境中^[36].

此外,抑制保护层砂浆中出现裂缝可有效提高PCCP的抗侵蚀性能,砂浆中碱性物质与骨料中碱活性矿物质易发生碱骨料反应,生成物与水接触后体积膨胀,从而造成砂浆内部出现裂缝.顾晓波^[37]对低碱活性物质进行了分析,粉煤灰、矿粉、硅灰、沸石粉等矿物掺合料均属于低碱性物质,对碱骨料反应均有抑制作用,未掺入矿物掺合料的砂浆在9个月后膨胀率达到0.1%,而在砂浆中分别掺入10%硅灰、20%粉煤灰、40%矿粉、20%沸石粉后,砂浆的膨胀率均降至0.03%,且随矿物掺合料掺量的增加,砂浆膨胀率逐渐降低.

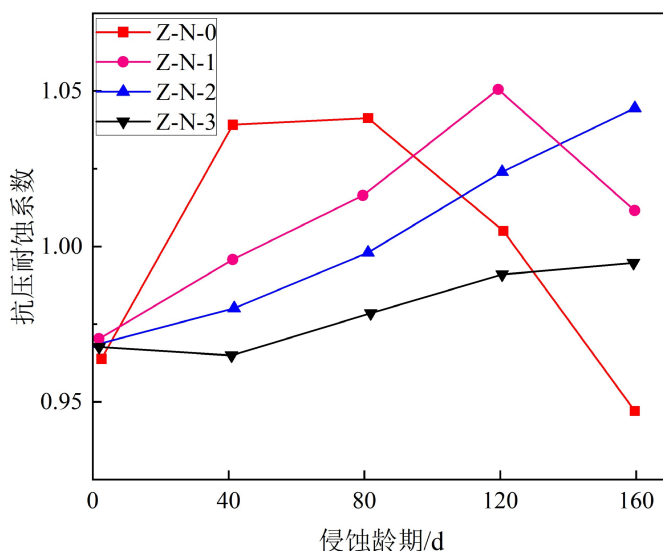
4.2 防腐涂层

改善PCCP保护层砂浆的性能除了可以提高自身的密实度外,还可以通过在砂浆表面涂一层或多层防腐涂料阻止外界离子进入.常用的防腐材料有聚氨酯涂料、聚乙烯覆盖层、环氧煤沥青涂料等^[38-39],其优缺点如表5所示^[40].

表 5 常用防腐涂料的优缺点^[40]

涂料品种	优点	缺点
环氧粉末涂料	附着力、耐磨性、抗阴极剥离性能好	耐冲击性欠佳、防水性差、修补困难
环氧煤沥青涂料	耐水性、耐微生物腐蚀及植物根茎穿透性好、耐磨性好、性价比高、耐土壤应力佳	耐紫外线性欠佳、阳光照射易黄变
聚乙烯覆盖层	绝缘性好、机械强度高、吸水率低、耐土壤应力好	黏结力差
3层聚乙烯	防腐性能好、高抗渗性、机械性能和耐土壤应力性良好	价格高、涂覆工艺复杂
聚氨酯涂料	柔韧性好、耐冲击、耐磨、防腐性好	价格较高

不同涂料在高盐渍化土壤中抗腐蚀性能存在差异,且附着能力和柔韧性也有较大差异.有研究表明,不同防腐涂料在不同侵蚀环境、不同温度下表现出的性能有较大差异,其中环氧煤沥青涂料的抗侵蚀性能最优异、柔韧性最好^[41],故该涂料是PCCP管道防腐涂料的最佳选择,山西万家寨引黄工程等重大工程中都采用环氧煤沥青作为防腐涂层^[42].杨博凯等^[43]研究了环氧煤沥青涂层厚度对PCCP保护层砂浆抗硫酸盐-氯盐复合溶液侵蚀性能的影响,发现在 SO_4^{2-} 与 Cl^- 共同作用下,随侵蚀时间的增加,砂浆抗压耐蚀系数总体呈现先增加后减小的趋势,环氧煤沥青涂层的砂浆抗压耐蚀系数增长缓慢,且涂层越厚,抗压耐蚀系数增长越缓慢,表明侵蚀离子在有涂层的砂浆中传输更缓慢(图12).

图 12 硫酸盐-氯盐耦合作用下侵蚀龄期与砂浆抗压耐蚀系数的关系^[43]

由于普通环氧煤沥青属于有机溶剂,易造成环境污染,且厚涂时容易产生气泡,故研究与使用无溶剂型环氧煤沥青成为主流趋势. Lin等^[44]研发了无溶剂型环氧煤沥青,其中掺入绢云母,由于绢云母特殊的2D片状结构,延长了水蒸气渗透的路径,从而较大提升其耐盐雾性能.南水北调中线京石段应急供水工程也应用了无溶剂型环氧煤沥青^[45],大大降低了施工成本,缩短了施工周期.然而在使用过程中发现,该涂层遇到雨水或经过曝晒后容易变色,故韩忠智等^[46]对无溶剂型环氧煤沥青进行改性研究,通过降低固化剂的用量,添加煤焦油替代部分煤沥青,制备了耐候性良好的无溶剂型环氧煤沥青.

根据上述研究可知,添加合适的矿物掺合料和外加剂可有效提高砂浆的密实度,从而降低服役环境中离子的渗透量和渗透速度;外涂环氧煤沥青等防腐涂料可有效阻止外界离子的进入.除上述提高密实度和外涂防腐涂层措施外,探究可吸附 Cl^- 的PCCP保护层砂浆对提高抗侵蚀性能也有重要意义,在PCCP保护层砂浆中添加可吸附 Cl^- 的物质,将进入砂浆的 Cl^- 物理吸附或化学结合后, Cl^- 不再进一步扩散到预应力钢丝表面,预应力钢丝表面 Cl^- 浓度小于临界浓度,可大大降低预应力钢丝断裂的风险.

5 结论

本文对PCCP保护层砂浆的性能要求进行梳理,归纳PCCP保护层砂浆性能的影响因素,并总结PCCP保护层砂浆抗侵蚀性能的改善方法,得到以下结论.

(1) PCCP保护层砂浆成型可采用辊射法、压力成型法和微调水胶比法. 辊射法与实际工程最接近,结果最准确;压力成型法较辊射法来说,可在实验室实现,且结果与实际工程较接近;微调水胶比法最简便、最易实现,但结果的准确性还需进一步证实. 目前,针对实验室开展PCCP保护层砂浆优化配比试验、多配比耐久性试验,仍缺少较便捷且接近实际的成型方法.

(2) PCCP保护层砂浆的基本性能与自身的密实度息息相关,配合比、制作工艺与养护条件均对其密实度有较大的影响. 当砂灰比在2.4~2.8时,PCCP保护层砂浆密实度较好,抗压强度和吸水率均表现优异. 采用辊射工艺成型,当辊射速度为中速、两辊射轮相切、辊射距离为40 cm时,砂浆的外观形状及性能均为最佳. 选用不同的养护制度时,蒸汽养护有利于提高砂浆早期的密实度,但不利于后期密实度的发展. 蒸汽养护14 d前抗压强度和 Cl^- 扩散系数均低于标准养护,14 d后明显增大,高于标准养护,但在工程实践中洒水养护的应用广泛,对于洒水养护下砂浆的性能还需进一步研究.

(3) 提高PCCP保护层砂浆密实度或涂防腐涂层可有效提高其抗侵蚀性能,从而延长PCCP的使用寿命. 在砂浆中掺入粉煤灰、硅灰、矿粉等矿物掺合料,可有效减小砂浆孔隙率、增加密实度,其中粉煤灰对减小孔隙率更有效;此外,砂浆中添加密实剂和防水剂均可提高密实度,掺入15%的密实剂可使砂浆中 Cl^- 扩散系数降至0.涂有环氧煤沥青的PCCP保护层砂浆可有效减少 Cl^- 与 SO_4^{2-} 的侵入,且涂层越厚、侵蚀越弱,环氧煤沥青涂层已在实际工程中得到广泛应用.

现阶段,PCCP保护层砂浆的研究多聚焦于抗压强度与吸水率的分析,针对其抗侵蚀性能提升的研究仅有少数学者开展. 然而,PCCP管道服役环境复杂,保护层砂浆遭受的盐渍土侵蚀种类繁多,基于此,结合管道服役环境及PCCP保护层砂浆的自身特性,关于 Cl^- 与 SO_4^{2-} 的扩散机制、穿透保护层至预应力钢丝表面的时间特性以及PCCP使用寿命预测等方面,亟需开展更为深入的研究.

参考文献:

- [1] 张宏宇. 预应力钢筒混凝土管结构性能及耐久性理论研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
ZHANG H Y. Research on structural performance and durability theory of prestressed concrete cylinder pipe[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)
- [2] 张红. 回眸凝望隐性的丰碑: 致敬中国预应力钢筒混凝土管(PCCP)发展三十年[J]. 混凝土世界, 2019(11): 8-12.
ZHANG H. Looking back at the invisible monument: Paying tribute to the 30-year development of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) in China[J]. China Concrete, 2019(11): 8-12. (in Chinese)
- [3] 张树凯, 沈冰. 我国PCCP的生产、使用取得重大突破[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(3): 22-26.
ZHANG S K, SHEN B. China has made significant breakthroughs in the production and application of PCCP[J]. China Concrete and Cement Products, 2011(3): 22-26. (in Chinese)
- [4] 沈之基, 郑小明. 美国PCCP管的失效及对中国给水管道应用的警示[J]. 水利规划与设计, 2015(3): 1-3+17.
SHEN Z J, ZHENG X M. Failure of PCCP pipes in the United States and its implications for water supply pipeline applications in China[J]. Water Resources Planning and Design, 2015(3): 1-3+17. (in Chinese)
- [5] KUWAIRI A. Water mining: The Great Man-Made River, Libya[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering, 2006, 159(5): 39-43.
- [6] ESSAMIN O, BUBTEINA N, LENGHI A, et al. Post rehabilitation assessment of system integrity and effectiveness of retro fitted cathodic protection using long term acoustic monitoring data[C]//Pipelines 2011: A Sound Conduit for Sharing Solutions. July 23-27, 2011. Reston, VA, USA. Reston: American Society of Civil Engineers, 2011: 79-88.
- [7] HASSI S, TOUHAMI M E, EJBOUH A, et al. Case study of the performance of prestressed concrete cylinder pipes in the Greater Agadir of Morocco[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2021, 12(2): 05021001.
- [8] 薛塞光. 干旱寒冷地区大口径PCCP管爆裂分析与对策[J]. 中国农村水利水电, 2012(1): 106-108.
XUE S G. Analysis and countermeasures of large-diameter PCCP pipe bursting in arid and cold regions[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(1): 106-108. (in Chinese)

- [9] 张金承,许高胜,唐虎. 某供水工程PCCP管道爆管原因分析[J]. 给水排水, 2012, 38(3): 97-99.
ZHANG J C, XU G S, TANG H. Analysis of the causes of PCCP pipeline bursting in a water supply project[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(3): 97-99. (in Chinese)
- [10] 刘文静. 新疆不同土质盐渍土离子含量及盐渍化程度快速测定技术研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
LIU W J. Research on rapid determination technology of ion content and salinization degree of different saline soil in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021. (in Chinese)
- [11] AWWA Standard. Prestressed concrete pressure pipe, steel-cylinder type: ANSI/AWWA C301—14[S]. Denver: American National Standards Institute, 2014.
- [12] AWWA Standard. Reinforced concrete pressure pipe, noncylinder type: ANSI/AWWA C302—22[S]. Denver: American National Standards Institute, 2022.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 预应力钢筒混凝土管: GB/T 19685—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Prestressed concrete cylinder pipe: GB/T 19685—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 混凝土输水管试验方法: GB/T 15345—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods of concrete pipes for water transmission: GB/T 15345—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [15] 周燕. 用辊射法制作保护层的原理以及参数的选择与应用[J]. 混凝土与水泥制品, 1991(6): 31-35.
ZHOU Y. Principle of making protective layer by roller spraying method, as well as the selection and application of parameters[J]. China Concrete and Cement Products, 1991(6): 31-35. (in Chinese)
- [16] 张永鸿. 辊射法制作预应力钢筒混凝土管保护层[J]. 江苏建材, 2000(1): 13-15.
ZHANG Y H. Roller shooting method for making protective layer of prestressed steel cylinder concrete pipe[J]. Jiangsu Building Materials, 2000(1): 13-15. (in Chinese)
- [17] 王冬, 孙国荣, 祝焯然, 等. 一种辊射工艺PCCP保护层砂浆室内检测试件的成型方法: 201910373924.9[P]. 2019-08-02.
WANG D, SUN G R, ZHU Y R, et al. A method for forming indoor test specimens of PCCP protective layer mortar using a roller-spraying process: 201910373924.9[P]. 2019-08-02. (in Chinese)
- [18] 王冬, 李文峰, 祝焯然, 等. 一种辊射工艺PCCP保护层砂浆设计配合比的快速评价方法: 201910378449.4[P]. 2019-07-30.
WANG D, LI W F, ZHU Y R, et al. A rapid evaluation method for the design mix ratio of PCCP protective layer mortar in roller-spraying process: 201910378449.4[P]. 2019-07-30. (in Chinese)
- [19] 周继凯, 金龙, 丁宁. 含砂量对水泥砂浆强度与孔结构的影响[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(20): 5855-5860.
ZHOU J K, JIN L, DING N. Effect of sand content on strength and pore structure of cement mortars[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(20): 5855-5860. (in Chinese)
- [20] 王坤. PCCP保护层砂浆配合比设计与性能试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
WANG K. Mix proportion design and performance test of PCCP cover mortar[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021. (in Chinese)
- [21] 阙小平, 张秀菲. PCCP砂浆保护层吸水率的质量控制方法研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(4): 38-42.
QUE X P, ZHANG X F. Research on quality control methods for water absorption rate of PCCP mortar protective layer[J]. China Concrete and Cement Products, 2018(4): 38-42. (in Chinese)
- [22] BERRAMI K, ECH-CHEBAB A, GALAI M, et al. Evaluation of fly ash effect on the durability of prestressed concrete cylindrical pipe in aggressive soil by electrochemical method[J]. Chemical Data Collections, 2021, 32: 100656.
- [23] HASSI S, TOUHAMI M E, BOUJAD A, et al. Assessing the effect of mineral admixtures on the durability of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) by means of electrochemical impedance spectroscopy[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120925.
- [24] EJBOUH A, ECH-CHEBAB A, GALAI M, et al. Effects of fly ash and simulation of the natural hot and dry climate of the Moroccan Desert Region on the durability of prestressed concrete cylinder pipes[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and

- Practice, 2022, 13(4): 04022029.
- [25] 王浩, 杨亚彬, 王坤, 等. PCCP保护层砂浆性能影响因素的试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 24-30.
WANG H, YANG Y B, WANG K, et al. Experimental study on the influencing factors of the properties of PCCP protective-layer mortar[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2022, 43(5): 24-30. (in Chinese)
- [26] 杨辉琴. 长距离输水工程采用大口径PCCP管的安全防护对策[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 138-143.
YANG H Q. Countermeasures for safety protection of large-diameter PCCP pipeline for long-distance water conveyance project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(12): 138-143. (in Chinese)
- [27] 侯国辉. 水利工程混凝土的早期强度发展与养护方法研究[J]. 中国水泥, 2024(4): 73-75.
HOU G H. Research on early strength development and curing methods of concrete in hydraulic engineering[J]. China Cement, 2024(4): 73-75. (in Chinese)
- [28] 刘穗虎, 曾晓辉, 唐卓, 等. 蒸养条件下机制砂混凝土的力学性能及干缩性能[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(5): 1886-1897.
LIU S H, ZENG X H, TANG Z, et al. Mechanical properties and drying shrinkage of manufactured sand concrete under steam curing[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(5): 1886-1897. (in Chinese)
- [29] 张志国. 不同养护方式对水工混凝土耐久性影响研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(2): 27-30.
ZHANG Z G. Research on the impact of different curing methods on the durability of hydraulic concrete[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2024, 52(2): 27-30. (in Chinese)
- [30] 马永刚. 蒸汽养护对机制砂高性能混凝土的力学性能及抗渗性影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
MA Y G. Influence of steam curing on mechanical properties and impermeability of high performance concrete with mechanism sand[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [31] 汪冬冬, 田伟丽, 王成启. 蒸汽养护及矿粉对混凝土力学性能、抗氯离子渗透性和抗冻性能影响[J]. 中国港湾建设, 2011(1): 23-26.
WANG D D, TIAN W L, WANG C Q. Influence of steam curing and slag on physical property, chloride penetration and freeze resistance of concrete[J]. China Harbour Engineering, 2011(1): 23-26. (in Chinese)
- [32] 陈富廉. 硅溶胶改性混凝土在标准养护与蒸汽养护下的性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
CHEN F L. Study on properties of silica sol modified concrete under standard curing and steam curing[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022. (in Chinese)
- [33] HU Y Q, HU S W, LI W H, et al. A time-variant model of chloride diffusion in prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) considering the effects of curing age[J]. Construction and Building Materials, 2023, 368: 130411.
- [34] SCALI M, SCHEINER P, AQUINO W, et al. Analysis and performance of PCCP mortar coating[C]//Pipelines 2003: New Pipeline Technologies, Security, and Safety. July 13-16, 2003. Baltimore, MD, USA. Reston: American Society of Civil Engineers, 2003: 972-982.
- [35] 王冬, 祝烨然, 陈国新, 等. 砂浆密实剂对PCCP保护层砂浆耐久性的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(10): 135-138.
WANG D, ZHU Y R, CHEN G X, et al. Research on influence of mortar dense agent for durability of PCCP protective layer mortar[J]. New Building Materials, 2017, 44(10): 135-138. (in Chinese)
- [36] 叶国文. 长距离大流量输水管道的防腐研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
YE G W. Anti-corrosion research on water transportation of long distance and large discharge[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [37] 顾晓波. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)耐久性探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2017, 45(11): 60-62+77.
GU X B. Discussion on durability of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP)[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2017, 45(11): 60-62+77. (in Chinese)
- [38] 陈广明. 环氧煤沥青防腐涂料在埋地管道中的施工[J]. 魅力中国, 2016(42): 11.
CHEN G M. Application of epoxy coal tar anticorrosive coating in buried pipelines[J]. Charming China, 2016(42): 11. (in Chinese)
- [39] 张其军. PCCP腐蚀与防护浅析[J]. 水利建设与管理, 2015, 35(6): 73-75.
ZHANG Q J. On PCCP corrosion and protection[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2015, 35(6): 73-75. (in

Chinese)

- [40] 石崇, 刘伟, 牛永锋. PCCP重防腐涂料简介[J]. 上海涂料, 2018, 56(5): 35-38.
SHI C, LIU W, NIU Y F. Brief introduction of PCCP heavy anti-corrosion coatings[J]. Shanghai Coatings, 2018, 56(5): 35-38. (in Chinese)
- [41] 杜建伟, 何鱼游, 张丽萍, 等. 盐碱地区埋地PCCP外防腐涂料的筛选研究[J]. 给水排水, 2011, 37(5): 89-92.
DU J W, HE Y Y, ZHANG L P, et al. Screening study on external anti-corrosion coatings for buried PCCP in saline-alkali areas[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(5): 89-92. (in Chinese)
- [42] 贾宝萍. 外防腐技术在PCCP上的应用[J]. 山西水利科技, 2004(2): 14-16.
JIA B P. The application of anti-corrosion technology on PCCP[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2004(2): 14-16. (in Chinese)
- [43] 杨博凯, 刘小艳, 胡钰泉, 等. 涂层厚度对PCCP砂浆抗硫酸盐-氯盐侵蚀性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(3): 34-38.
YANG B K, LIU X Y, HU Y Q, et al. Effect of coating thickness on the sulfate-chloride coupling corrosion resistance of PCCP mortar[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(3): 34-38. (in Chinese)
- [44] LIN Z, XU C Z, ZHANG L, et al. The research and application of protective coating for PCCP[J]. Corrosion Science and Technology, 2008, 7(5): 265-268.
- [45] 杜建伟, 何鱼游, 林竹, 等. 8703超厚膜混凝土防腐涂料的研制及其应用[J]. 现代涂料与涂装, 2007, 10(8): 6-8.
DU J W, HE Y Y, LIN Z, et al. Development of 8703 heavy-film anti-corrosive concrete coating and its application[J]. Modern Paint & Finishing, 2007, 10(8): 6-8. (in Chinese)
- [46] 韩忠智, 丁超, 李石, 等. PCCP用耐候性无溶剂环氧煤沥青涂料的研制[J]. 上海涂料, 2018, 56(5): 6-10.
HAN Z Z, DING C, LI S, et al. Development of solvent-free epoxy coal tar pitch coatings with good weatherability for PCCP[J]. Shanghai Coatings, 2018, 56(5): 6-10. (in Chinese)

责任编辑: 张自强