DOI:10.3724/j.issn.1004-3918.2026.074

输水隧洞纤维混凝土衬砌力学性能研究进展

丁永明[1]， 史宇豪[2]， 胡志明[1]， 冉金林[2]， 朱贵荣[1]， 王东星[3]

（1. 中国水利水电第七工程局有限公司，成都 610213； 2. 南华大学 土木工程学院，湖南 衡阳 421001；
3. 武汉大学 土木建筑工程学院，武汉 430072）

摘 要： 为缓解水资源时空分布不均及局部地区水资源短缺问题，建设安全、高效、长寿命运行的输水隧洞已成为水利工程的重要发展方向。衬砌结构作为保障隧洞稳定运行的关键，其力学性能与耐久性直接影响工程安全。然而，现有输水隧洞衬砌材料在高内外水压及复杂边界条件下，普遍存在抗裂、抗拉及耐久性能不足的问题。为此，本文分析了输水隧洞在复杂受力条件下的围岩失稳与破坏机制，综述了现有衬砌材料在工程中的应用现状，指出普通混凝土在延性、韧性及抗拉性能方面的局限性。在此基础上，系统梳理了聚丙烯纤维、钢纤维及其他纤维混凝土的力学性能特点及其在输水隧洞衬砌中的应用效果，并对单一纤维混凝土在抗裂性、抗拉性能及施工适应性方面的优势与不足进行了分析。进一步针对单一纤维喷射混凝土性能提升有限的问题，总结了混杂纤维混凝土在提高衬砌结构稳定性和耐久性方面的潜在优势。研究表明，发展多尺度协同增强的纤维混凝土是提升输水隧洞衬砌性能的重要方向。本文可为输水隧洞衬砌材料的优化设计与工程应用提供参考。

关键词： 输水隧洞；纤维混凝土；衬砌材料；力学性能

中图分类号： TU528.58 **文献标志码：** A **文章编号：** 1004-3918(2026)03-0569-14

Review on the Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Lining in Hydraulic Tunnels

DING Yongming[1], SHI Yuhao[2], HU Zhiming[1], RAN Jinlin[2], ZHU Guirong[1], WANG Dongxing[3]

（1. China Water Resources and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co. Ltd., Chengdu 610213, China; 2. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China）

Abstract: To address the uneven temporal and spatial distribution of water resources and water shortages in some regions, the construction of safe, efficient, and long service life water conveyance tunnels has become an important development direction in hydraulic engineering. As a key component for tunnel safety, the lining structure directly affects the long term stability of the project through its mechanical performance and durability. However, under high internal and external water pressure and complex boundary conditions, existing lining materials generally show insufficient crack resistance, tensile performance, and durability. In this paper, the instability and failure mechanisms of surrounding rock in water conveyance tunnels under complex stress conditions are analyzed. The application status of existing lining materials in engineering practice is reviewed. The limitations of ordinary concrete in ductility, toughness, and tensile performance are also discussed. On this basis, the mechanical properties and engineering effects of polypropylene fiber reinforced concrete, steel fiber reinforced concrete, and

收稿日期： 2025-11-15 **修回日期：** 2026-01-13 **接受日期：** 2026-03-19

基金项目： 湖南省自然科学基金青年A类项目(2025JJ20049)；湖北省自然科学基金计划杰出青年项目(2024AFA051)；山东省自然科学基金面上项目(2023ME165)

作者简介： 丁永明(1984-)，男，高级工程师，主要从事水工隧洞衬砌结构研究，E-mail:719928612@qq.com

引用格式： 丁永明，史宇豪，胡志明，等. 输水隧洞纤维混凝土衬砌力学性能研究进展[J]. 河南科学，2026，44(3)：569-582.

Ding Y M，Shi Y H，Hu Z M，et al. Review on the mechanical properties of fiber-reinforced concrete lining in hydraulic tunnels[J]. Henan Science，2026，44(3)：569-582.

other fiber reinforced concretes used in tunnel linings are systematically summarized. Their advantages and disadvantages in crack resistance, tensile behavior, and construction adaptability are evaluated. In view of the limited improvement achieved by single fiber shotcrete, the potential advantages of hybrid fiber reinforced concrete in enhancing lining stability and durability are further summarized. The results indicate that the development of fiber reinforced concrete with multi scale synergistic enhancement is an important direction for improving the performance of water conveyance tunnel linings. This review can provide a reference for the optimal design and engineering application of lining materials in water conveyance tunnels.

Key words: hydraulic tunnels; fiber-reinforced concrete; lining materials; mechanical properties

0 引言

我国水资源时空分布不均，地域性差异显著，南北、东西及各局部地区的水资源禀赋与需求矛盾日益突出。伴随快速城市化、水资源短缺加剧以及气候变化带来的不确定性，实现水资源的科学调配已成为保障国家水安全、支撑经济社会可持续发展的战略问题[1-2]。为此，国家部署实施了包括172项节水供水重大水利工程在内的一系列水资源配置工程，旨在优化水资源格局、提升供水保障能力并促进区域协调发展[3-4]。

输水隧洞作为水资源配置工程的核心输水载体，因其具有输水效率高、蒸发损失小、水质保障性好、对地表生态扰动小等显著优势，在跨流域调水、区域供水网络构建中发挥着不可替代的作用[5-6]。然而，随着工程向地质条件更复杂、埋深更大、输水压力更高的区域拓展，输水隧洞的建设和长期安全运行正面临前所未有的严峻挑战。这些挑战突出表现为：高外水压力威胁衬砌结构稳定并可能导致内水外渗；高内水压力对衬砌结构的抗裂防渗性能提出极高要求；内外水压力频繁交变或强腐蚀性地下水环境；高地应力导致围岩大变形甚至岩爆风险；软弱破碎围岩（如膨胀岩、高地应力软岩）自稳能力差，易引发塌方；以及穿越大型断层破碎带时围岩渗透性强、稳定性极差等特殊工况[7-8]。

面对上述极端服役环境，广泛采用的普通混凝土衬砌因其脆性大、抗拉强度低、变形能力差等特性，而极易在复杂应力、变形条件下开裂，且裂缝扩展难以控制，严重削弱了结构的承载能力、防渗性能和长期耐久性，难以满足深埋输水隧洞工程对高安全、长寿命的需求[9]。例如，在科卡科多-辛克雷水电站建设中，高内压作用下普通混凝土衬砌开裂引发的内水外渗问题，仍是当前隧洞运行中频繁遇到的困难之一[10]。刘文博等[11]以滇中引水工程的龙蟠—乔后断裂带F_{10-2}为研究对象，通过开展模型试验证实了错动盘和上影响带的一定范围内均存在高拉伸应变区，普通混凝土衬砌在此段更容易发生拉裂破坏。因此，研发和应用性能更优越的新型衬砌材料势在必行。纤维混凝土通过在混凝土基体中掺入离散短纤维，如钢纤维、合成纤维和玄武岩纤维等，可改善材料微观结构，并在抗裂性、韧性、抗拉抗弯强度以及抗冲击和抗疲劳性能等方面表现出明显优势。其在控制裂缝开展、提高结构延性和抵抗局部破坏方面具有较大潜力，被认为是应对复杂地质和水力条件下输水隧洞衬砌服役问题的重要技术途径。

基于此，本文围绕输水隧洞在高内外水压及复杂地质边界条件下的围岩-衬砌相互作用机理与潜在失稳破坏模式展开综述，分析现有工程实践中普通混凝土衬砌的主要局限，重点总结纤维混凝土衬砌在力学性能和耐久性方面的优势，并进一步探讨混杂纤维协同增强衬砌综合性能的研究方向，以期为输水隧洞高性能纤维混凝土衬砌的研究与工程应用提供参考。

1 输水隧洞围岩失稳机制研究现状

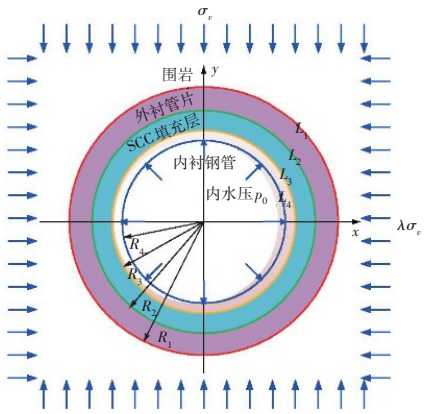
输水隧洞开挖后围岩稳定性的分析，是明确衬砌结构受力特征及材料性能需求的重要基础，对保障工程安全、降低运行风险及提升经济性具有重要意义。总体来看，输水隧洞围岩-衬砌体系的力学行为及破坏机制，主要受内外水压环境以及软弱围岩、地温和复杂地质构造等因素的共同影响。

1.1 内外水压环境

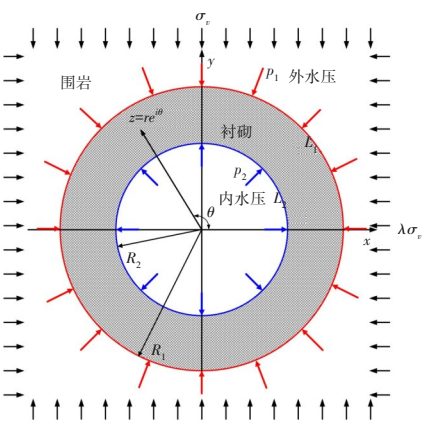
在有压运行条件下，输水隧洞的内水压主要来源于输水压力及水体自重。Zhu等[7]、Xu等[8]、Li等[12]研究表明，衬砌所承受的内力，尤其是拉应力，随输水压力、水位高度及隧洞半径的增加而显著增大，并在局部位置出现应力集中。刘宜杰等[13]以珠江三角

洲水资源配置工程为对象，基于复变函数方法建立层叠式衬砌力学模型（图1(a)），结果表明，随着内水压的增加，衬砌与围岩在径向上呈现压缩趋势，而环向应力逐渐由压应力向拉应力转变，表现出扩胀特征，且该影响由衬砌内侧向外逐渐衰减。此外，Zhou等[14]、Jin等[15]及刘仲秋和章青[16]研究指出，在高内水压作用下，衬砌内部易产生裂缝，水流沿裂缝渗出，当渗透力超过围岩-衬砌界面的抗拉强度时，将诱发界面分离破坏。

当输水隧洞穿越饱水岩层、含水裂隙带或断层破碎带时，外部地下水形成的静水压力直接作用于衬砌外壁（图1(b)），从而改变围岩-衬砌体系的受力状态。在内水压、围岩压力和外水压共同作用下，界面法向接触力可能减小，在一定程度上缓解内水压引起的膨胀效应，使衬砌与围岩形成协同受力体系；当外水压显著大于内水压时，衬砌由主要承载结构转变为荷载传递介质，围岩与衬砌共同承担外部荷载[8,17]。然而，Yang等[18]、Chen等[19]研究表明，长期高外水压环境也可能引发渗透破坏过程，即外



(a)层叠式衬砌输水隧洞受力图[13]



(b)内外水压共同作用[8]

图1　输水隧洞受力示意图

Fig.1　Schematic diagram of forces in a water conveyance tunnel

水渗流削弱围岩颗粒间的摩擦与胶结作用，导致围岩软化变形加剧，从而增加支护结构受力并诱发失稳风险。综上，内外水压耦合作用显著影响输水隧洞围岩-衬砌体系的受力特征与破坏模式，对衬砌材料提出了更高要求。衬砌材料不仅应具备较高的抗拉和抗压强度及良好的界面黏结性能，还需具备低渗透性和优良耐久性，以实现与围岩的协同作用并保障隧洞的长期安全运行。

1.2　特殊边界条件

1.2.1　软弱围岩

软弱围岩通常具有较差的物理性质和较低的力学强度，开挖后易发生显著的应力重分布和大变形。同时，其较高的透水性会提高孔隙水压力，降低围岩有效应力，进而削弱围岩抗剪强度。例如，在兰州水源地引水隧道中，富水侵蚀导致泥质砂岩在96 h饱和过程中力学性能下降10.284%，受损区域位移增加647 mm[20]。因此，明确软弱围岩条件下的受力与变形机制，是实现衬砌合理设计和安全施工的重要前提。朱艳丽[21]对南水北调西线工程深埋隧洞软岩变形机理的研究表明，在高地应力作用下，开挖瞬间会引起围岩应力回弹与释放，从而导致剪切膨胀变形；与此同时，软弱围岩在剪切带内发生塑性流动，并诱发层间拉裂破坏。若不能及时采取有效支护措施，围岩将迅速发生变形并侵入隧洞净空[22]。由此可见，在富水软弱围岩环境下，衬砌材料除应具备较高的抗渗性和耐蚀性以抵抗水弱化作用外，还需具有与复杂受力相适应的力学性能，以满足非对称瞬时荷载和长期流变作用条件下的安全服役需求。

1.2.2　高地温

我国西部部分地区位于大陆板块活动强烈地带，高地热环境较为普遍。这不仅增加了输水隧洞施工难度，也对衬砌结构的长期稳定性和运行安全构成威胁。彭立锋等[23]、Yao等[24]研究发现，当地应力σ_v较小时，且水体与围岩之间的温差越大，高地温高压输水隧洞中的拉应区演化越快、影响范围越大，如图2所示。在高内水压与高温差共同作用下，衬砌内部易形成拉伸裂缝，使低温高压水侵入结构内部，引起环向温度变化并进一步诱发次生裂缝。当当地应力较高且分布相对均匀时，可在一定程度上抵消膨胀拉应力，降低最大主应力，从而抑制裂缝萌生与扩展；但若高地应力分布显著不均，则反而可能诱发水力劈裂破坏[25]。因此，在高地温环境下，输水隧洞衬砌材料应同时具备良好的耐热性、抗裂性和

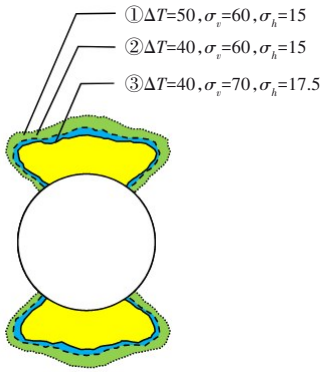


图2　温差与地应力变化对围岩拉应力区的影响
（单位：温度/℃，应力/MPa）[23]

Fig.2　Effects of temperature difference and in-situ stress changes on tensile stress areas in surrounding rock

抗渗性能，以应对温差效应与非均匀地应力耦合作用下的开裂风险，防止高压水侵入后引发水力劈裂及次生破坏。

1.2.3　复杂地质构造

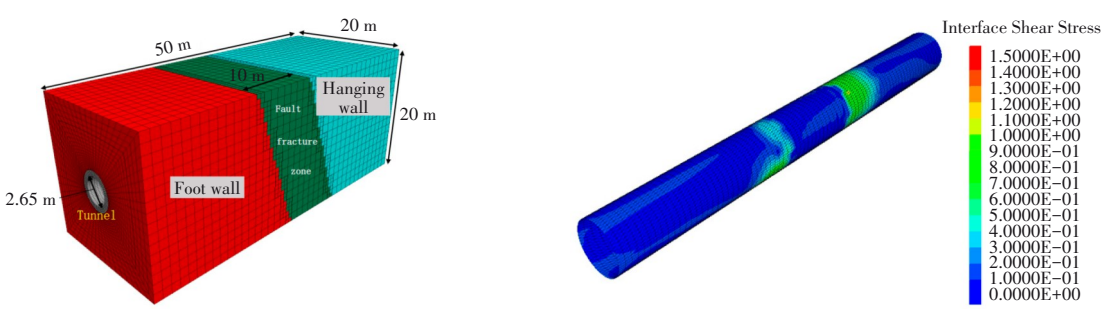
断层、褶皱、节理和破碎带等复杂地质构造是地下输水隧洞施工和运行中的重要不利因素。这些结构薄弱面在开挖扰动作用下会破坏原有地应力平衡，引起应力重分布和局部集中，从而诱发围岩失稳[26]。李凌子和肖明[27]依托牛栏江—滇池补水工程引水隧洞，采用考虑法向与切向非线性的薄层单元模拟断层，并基于FLAC3D开展数值分析。结果表明，断层附近岩体强度较低，隧洞开挖引发的应力集中范围较广，围岩易出现大范围拉裂破坏。此外，在地震作用下，断层和褶皱带往往伴随着更为显著的岩层变形。Zhang等[28]针对跨断层输水隧洞建立了地震-断层耦合模型（图3），揭示了断层错动与地震荷载的联合作用机制。研究表明，该耦合作用产生的挤压-剪切效应会促使围岩-衬砌界面发生闭合与滑移，衬砌破坏主要集中于断层影响带内，且以剪切破坏为主。因此，对于穿越断层、褶皱及破碎带等复杂地质构造的输水隧洞，衬砌设计的关键在于应对应力集中引起的围岩拉裂以及断层滑移导致的强剪切作用。这要求衬砌材料不仅应具备较高的抗剪强度和韧性，以抵抗错动剪切破坏，还应具备较好的局部抗拉性能，以抑制应力集中区裂缝的产生与扩展。

2　输水隧洞衬砌材料力学性能研究现状

2.1　混凝土衬砌工程应用

输水隧洞作为水利建设中的重要工程形式，在水资源输送、水电站建设、生态保护和城市供水等领域均得到广泛应用。在此类工程中，喷射混凝土是围岩加固和衬砌支护的重要手段，其基本原理是将流态混凝土喷射至不规则开挖面，形成具有一定抗弯和抗剪能力的衬砌结构，并与锚杆、钢筋网等共同构成联合支护体系。当前，国内外已有大量关于输水隧洞混凝土衬砌的工程应用实例，其典型案例见表1和图4。由表1可知，多数早期建成的输水隧洞均采用喷射普通混凝土作为主要衬砌形式之一，并在一定条件下取得了较好的工程效果。

然而，随着输水隧洞工程逐步向高内外水压、复杂边界条件及富水不良地质环境发展，普通混凝土衬砌的局限性日益显现。一方面，特殊服役环境使衬砌结构中的拉压应力区显著扩大；另一方面，富水环境和长期水流侵蚀会进一步削弱围岩条件，导致围岩塑性区范围扩大，从而加剧衬砌结构开裂、剥落等病害，削弱其支护与封闭功能。因此，研发能够满足复杂工况需求的高性能衬砌材料已成为输水隧洞工程的重要课题。为克服普通混凝土在延性、韧性和抗拉性能方面的固有不足，结构工程领域提出了纤维混凝土的概念。其基本思路是在混凝土基体中掺入一定数量的纤维材料，形成分散且相对均匀的



（a）三维模型　　（b）应力云图

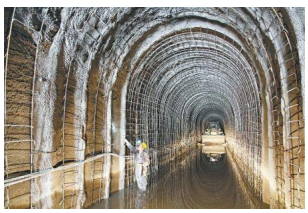
图3　跨断层输水隧洞模拟[28]

Fig.3　Cross-fault hydraulic tunnel simulation

表1　现有工程实例

Tab.1　Existing engineering projects

工程	地质条件	衬砌方案
秦岭输水隧洞[29]	大规模断层、围岩由断层糜棱岩、碎裂岩组成、富存基岩裂隙水	钢筋网+喷射混凝土
引黄工程交汾灵引水隧洞[30]	水文地质条件复杂、隧洞穿过破碎带	钢筋网+钢拱架+喷射混凝土
宝泉抽水蓄能电站6号支洞[31]	围岩松散，节理裂隙滑动，渗水饱和后围岩稳定性极差	钢支撑+钢筋网+喷混凝土
南水北调中线工程吴庄隧洞[32]	大流量、低水头、大断面，地质条件复杂	锚杆+喷射混凝土
乌弄龙水电站地下厂房引水隧道[33]	围岩且洞身大、局部岩体破碎、地质断层切割	随机锚杆+锚筋桩挂网+喷射混凝土
察汗乌苏水电站引水发电洞[34]	挤压断裂和紧密褶皱地质带，围岩为板岩夹凝灰质粉砂岩	钢筋网+喷射钢纤维混凝土+聚丙烯纤维混凝土



（a）秦岭输水隧洞



（b）南水北调黄河隧道



（c）锦屏二级水电站引水隧洞



（d）引江补汉工程输水隧洞

图4　工程实例照片

Fig.4　Engineering case example photographs

增强网络，从而实现应力传递与分散，并抑制裂缝的萌生与扩展。近年来，部分输水隧洞工程借鉴地上结构工程的应用经验，将纤维混凝土逐步引入衬砌体系，在一定程度上弥补了普通混凝土在力学性能和耐久性能方面的不足。

2.2　纤维混凝土衬砌材料性能研究

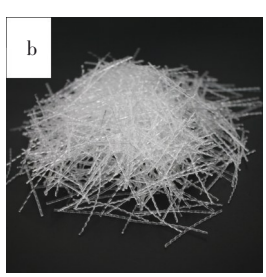
目前，已建或在建输水隧洞工程中应用的纤维混凝土衬砌材料主要以聚丙烯纤维和钢纤维为主，如图5所示；在部分特殊工程条件下，也会掺入聚乙烯醇纤维、聚丙烯腈纤维、聚酯纤维及玄武岩纤维等，以满足特定服役性能要求。

2.2.1　聚丙烯纤维

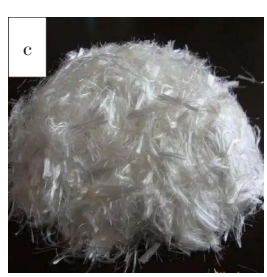
与普通混凝土相比，聚丙烯纤维混凝土具有较好的早期抗拉性能和延性，能够有效降低高性能混凝土早期自收缩和开裂应力，提高材料抗裂性能，因此在隧洞衬砌工程中表现出较好的裂缝控制能力[35-38]。梁宁慧等[39]在重庆某公路隧洞二次衬砌中应用聚丙烯纤维混凝土，并对其工作性能和抗裂性能进行了综合评估。结果表明，纤维掺入后，裂缝长度和最大裂缝宽度分别减少53.5%和79.9%，抗裂强度提高10.8%。徐子瑶等[40]针对地铁隧道喷射混凝土支护中易出现的开裂和空鼓等质量缺陷，提出并验证了聚丙烯纤维增强方案，结果表明，掺入聚丙烯纤维后，混凝土在裂纹处的残余抗拉强度显著提高，有助于抑制喷层质量缺陷。Ren等[41]依托重庆某高速公路超长隧道工程，通过现场试验和数值模拟对比了聚丙烯纤维混凝土与普通混凝土衬砌性能，结果显示，聚丙烯纤维混凝土衬砌的应变减小45.45%，最大拉应力和压应力分别提高15.46%和6.53%，说明其在变形抑制和应力重分布方面具有一定优势。



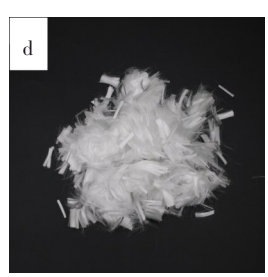
（a）钢纤维



（b）聚丙烯（PP）纤维



（c）聚乙烯醇（PVA）纤维



（d）聚丙烯腈（PAN）纤维

图5　纤维实物图

Fig.5　Fiber material actual photographs

聚丙烯纤维混凝土在输水隧洞衬砌工程中同样得到应用。Behfarnia和Behravan[42]针对不利边界条件下的输水环境，对比了聚丙烯纤维混凝土与普通混凝土的力学性能，结果表明，当聚丙烯纤维掺量为0.8%时，混凝土抗压强度和抗拉强度分别提高3.3%和17.5%，同时其弯曲强度、韧性和吸能能力均得到改善。杨示文和全燕文[43]提出在混凝土中掺入适量改性聚丙烯微纤维，并将其应用于龙滩地下引水发电系统洞室群开挖衬砌。通过对隧洞侧墙检测发现，改性聚丙烯纤维混凝土的抗裂和限裂能力显著提高，如表2所示，验证了喷射聚丙烯微纤维混凝土在洞室衬砌中的可行性。

此外，在特殊服役环境下，聚丙烯纤维混凝土还可针对性满足更高性能要求。例如，在上海苏州河段深层排水调蓄工程中，隧洞衬砌长期承受频繁充排水荷载，官林星等[44]提出将粗合成纤维应用于衬砌混凝土中。通过室内力学试验与素混凝土对比发现，纤维混凝土最大裂缝宽度降低45%，有利于控制衬砌整体应变和裂缝发展。又如，在高地温条件下，薛晓飞[45]研究了不同掺量聚丙烯纤维混凝土的力学性能，结果表明，与普通混凝土相比，不同掺量的聚丙烯纤维混凝土在高温条件下均表现出较好的抗折和抗拉性能，如图6所示。总体来看，聚丙烯纤维混凝土在改善早期抗裂性、提高残余抗拉能力和控制裂缝开展方面具有较明显优势，尤其适用于对抗裂和变形控制要求较高的输水隧洞衬砌。但其对承载力和刚度的提升相对有限，在高荷载或强扰动环境下往往需要与其他增强措施协同使用。

2.2.2 钢纤维

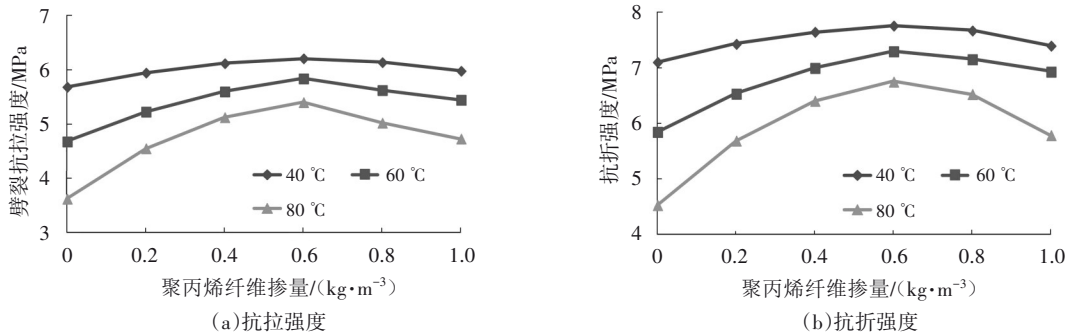
相比普通混凝土，钢纤维混凝土在抗压、抗拉、抗冲击和抗疲劳等力学性能方面具有更明显的增强效果，因此在高磨损、强扰动和高耐久性要求的隧洞工程中应用较多[40,46-48]。刘新荣等[49]在摩天岭隧道通风斜井衬砌中应用喷射钢纤维混凝土，结果表明，尽管钢纤维对抗压强度提升有限，但其抗拉强度、抗裂性能及抗渗压力均得到改善，同时有助于提高混凝土的密实性、耐久性和体积稳定性。崔光耀等[50]针对高烈度地震区隧道软硬围岩交界段，在二次衬砌中采用钢纤维混凝土后，支护结构的强度、刚度和韧性均有所提高，围岩接触面应力峰值在软岩和硬岩条件下分别提高35%和20%，说明钢纤维有助于优化荷载传递路径并增强结构整体性。安栋等[51]在天坪寨隧道F1断层段的抗震对比试验中进一步发现，钢纤维混凝土衬砌的横向位移和纵向位移分别增加12.57%和1.43%，但竖向位移减小33.83%；同时，最大主应力和最小主应力分别提高26.09%和19.69%，综合抗震性能提高59.72%。这表明，钢纤维能够通过提高混凝土韧性，调节地震作用下的变形模式与应力状态，从而增强结构抗震能力。

在输水隧洞衬砌工程中，钢纤维混凝土的应用同样取得了较好效果。段福荣等[34]在察汗乌苏水电站引水发电洞建设中，采用钢纤维喷射混凝土替代素混凝土作为永久衬砌，改善了传统衬砌中常见的裂缝和耐久性问题。陈赤坤等[52]在白水江三级电站引水隧洞承压洞施工设计中同样采用钢纤维喷射混凝土，有效减小了开挖引起的围岩变形，并使控制荷

表2 微聚丙烯纤维混凝土性能参数[43]

Tab.2 Performance parameters of micro-polypropylene fiber reinforced concrete

掺量/(kg·m^{-3})	28 d抗压/MPa	28 d抗拉/MPa	冻融循环次数/次	黏结强度/MPa	平均回弹量%
0.9	36.8	2.67	>100	0.73	9.4



(a)抗拉强度 (b)抗折强度

图6 不同温度下聚丙烯纤维掺量对抗折、抗拉力学性能[45]

Fig.6 Influence of polypropylene fiber dosage on flexural and tensile mechanical properties at different temperatures

载由围岩变形逐步转向内水压力。湛正刚等[53]在洪家渡水电站中对比了钢纤维喷射混凝土与挂网喷混凝土，结果表明，采用钢纤维后，衬砌厚度可节省25%~30%，回弹量减少20%，工期缩短20%~30%，显示出较好的工程经济性。周文鼎等[54]在珠江三角洲水资源配置工程输水洞建设中，采用1%掺量钢纤维混凝土进行衬砌。监测结果表明，在围岩、管片和纤维混凝土衬砌共同受力条件下，当隧洞开始出现裂缝时，钢纤维混凝土衬砌仍可承受0.83 MPa的内水压力；当裂缝宽度达到规范限值2 mm时，仍可承受0.93 MPa内水压力，说明开裂后衬砌仍具有一定残余承载能力（图7）。

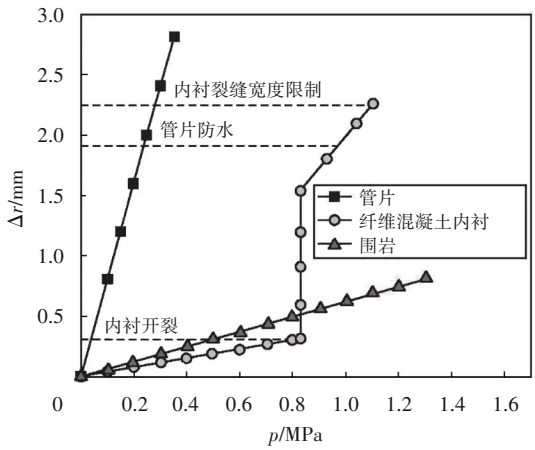


图7　围岩及衬砌共同作用[54]

Fig.7　Interaction between surrounding rock and lining

对于断层及裂隙发育地段，钢纤维混凝土衬砌也表现出较好的适用性。例如，在瀑布沟水电站导流洞工程中，采用“钢纤维喷射混凝土+锚杆”组合替代现浇钢筋混凝土，施工7 d后即可达到设计强度的90.1%，28 d后达到设计强度要求[55]。类似地，在新疆某深埋断层及高地应力区域水工隧洞中，Li等[56]在开挖后立即施作10 cm钢纤维喷射混凝土和40 cm素混凝土衬砌。与待围岩稳定后再采用素混凝土喷射衬砌相比，其最大变形、最大水平位移和最大垂直位移分别减少58.94%、62.74%和76.31%，表明钢纤维喷射混凝土在快速控制围岩变形和维持围岩稳定方面具有明显作用。钢纤维混凝土在提高衬砌承载力、韧性、抗裂性和残余承载能力方面优于聚丙烯纤维混凝土，尤其适用于高内压、断层破碎带及强扰动等复杂工况。但其自重较大、施工回弹控制和分散均匀性要求较高，在实际应用中仍需兼顾施工工艺与经济性。

2.2.3　其他纤维

除钢纤维和聚丙烯纤维外，在部分特殊工程中还会掺入其他类型纤维，以满足特定服役性能要求，如聚乙烯醇纤维、聚丙烯腈纤维、聚酯纤维和玄武岩纤维等。宁逢伟等[57]研究了聚乙烯醇纤维掺量对水工混凝土抗裂性能的影响，并通过与基准混凝土对比确定其最佳掺量为0.1%。钟卫杰和李镇云[58]在东流溪二级水电站有压隧洞建设中，将聚丙烯腈纤维应用于内水压力作用下的输水隧洞衬砌。根据质量检测结果和多年服役情况，聚丙烯腈纤维可明显改善混凝土韧性和抗冲击性能，并进一步提升其抗裂、抗冻和抗渗等耐久性能。此外，张岩等[59]以布仑口—公格尔水电站高温引水隧洞为例，研究了高温环境下聚酯纤维混凝土的性能。结果表明，在3 d龄期内，与常温条件相比，在0~55 ℃温差范围内，聚酯纤维混凝土表现出优于素混凝土的抗裂性能，且在35 ℃温差条件下仍具有1.75 MPa的劈裂抗拉强度；但在7 d龄期时，其各温度条件下的抗裂强度均低于普通混凝土。邓志云等[60]提出采用玄武岩纤维提高衬砌结构承载能力，并对纤维体积率为0~0.5%的玄武岩纤维混凝土试件开展拉压力学性能试验。结果表明，掺入玄武岩纤维可有效提高混凝土抵抗裂缝扩展的能力，最佳掺量为0.2%，对应混凝土初始开裂荷载和P0.30分别提高38.64%和5.54%。其他类型纤维在特定工况下能够体现出较强的针对性优势，如高温环境适应性、抗冲击性或抗裂耐久性能提升等，但其工程应用数量相对有限，服役机理和长期性能仍需进一步研究。

3　现有研究存在问题及解决思路分析

3.1　单掺纤维混凝土衬砌不足之处

在输水隧洞开挖阶段，衬砌结构通常面临复杂地质构造、高内外水压、高地应力及渗流侵蚀等不利条件，这对衬砌材料的抗拉、抗弯、抗裂及耐久性能提出了较高要求。已有研究表明，单掺纤维混凝土虽然能够在一定程度上改善普通混凝土的脆性缺陷，但在复杂边界条件下仍存在明显局限，裂缝仍可能萌生并扩展，严重时甚至导致衬砌发生局部失稳。以聚丙烯纤维为例，其弹性模量明显低于钢纤维，但在早期裂缝控制方面具有一定优势，同时对混凝土韧性、抗冲击性能、抗渗性和耐腐蚀性的改善也较为明显。然而，由于其对抗弯和抗拉性能的提升相对有限，在高地应力或强扰动条件下，衬砌结构仍可能

表现出较大变形，并进一步诱发失稳破坏。在输水隧洞运营阶段，衬砌长期处于富水环境中，持续渗流作用及化学侵蚀会进一步加速裂缝萌生与扩展，导致混凝土剥落甚至局部坍塌。对于钢纤维混凝土而言，钢纤维的掺入在提高抗裂性和承载能力的同时，也可能对混凝土内部密实性产生不利影响，从而影响其抗渗性能。研究表明，当钢纤维掺量较低时，纤维混凝土的抗渗性能通常优于普通混凝土；但当掺量过高时，内部孔隙和界面缺陷增加，反而可能导致抗渗性能下降。目前，针对输水隧洞纤维混凝土长期服役耐久性的研究仍相对不足，尤其是在高水压渗流和侵蚀环境下衬砌长期稳定性的认识尚不充分。

此外，单掺纤维混凝土还面临经济性方面的制约。尽管钢纤维混凝土在抗拉强度和抗裂性能方面表现较好，但钢纤维的大量掺入往往显著提高工程成本。相比之下，以聚丙烯纤维为代表的合成纤维混凝土在经济性方面更具优势。Lin等[61]以聚丙烯纤维和聚甲醛纤维替代钢纤维掺入混凝土，并通过抗压和抗拉试验寻求力学性能与经济效益之间的平衡。结果表明，在抗拉强度仅小幅下降的条件下，合成纤维混凝土的综合经济效益较单掺钢纤维混凝土提高50.2%。Ali等[62]在路面纤维混凝土研究中进一步比较了钢纤维与聚丙烯纤维的综合成本，结果显示，在1%掺量条件下，钢纤维混凝土单位体积综合成本为150.1美元，而聚丙烯纤维混凝土仅为95.8美元，成本降低36.2%，同时碳排放减少33.8%。因此，如何互补不同纤维之间的缺陷，以求获得更加完善且经济的纤维混凝土材料也尤为重要。

3.2 混杂纤维混凝土衬砌应用前景

3.2.1 可行性分析

在边界条件复杂和高水压环境下，单掺纤维混凝土衬砌在力学性能、长期服役性能及工程经济性等方面均存在一定局限，难以全面满足输水隧洞对衬砌结构稳定性和长期耐久性的要求。因此，开发兼具优良性能与经济合理性的高性能衬砌材料，仍是输水隧洞工程的重要研究方向。针对常用纤维类型的性能差异，Zargaran等[63]揭示了纤维弹性模量对混凝土增强效果的显著影响。其中，高模量纤维如钢纤维主要有助于提高混凝土的抗拉和抗折强度，而低模量纤维如聚丙烯纤维和聚乙烯醇纤维则更有利于改善韧性和抗冲击等能量吸收性能。这表明，仅依赖单一类型纤维难以同时实现混凝土高强度与高韧性的统一。基于此，混杂纤维混凝土逐渐受到关注，其基本思路是在混凝土中同时掺入高模量纤维和高延性纤维，以发挥不同纤维的协同增强作用。已有大量研究[64-70]表明，合理的混杂设计能够有效激发纤维间的协同效应，使混凝土在增强和增韧两方面同时受益，从而显著提高其抗裂和限裂能力。表3系统汇总了部分代表性研究中混杂纤维组合及其对混凝土关键力学和耐久性能的提升效果。由表3可知，通过优化纤维种类和掺量，混杂纤维混凝土在弹性模量、极限强度、韧性及抗收缩开裂等方面，均较单一纤维混凝土或普通混凝土表现出更优性能，体现出较明显的混杂效应优势。

除力学性能外，混杂纤维混凝土在长期耐久性方面同样具有较大的提升潜力。Xu等[71]采用纤维素纤维、聚乙烯醇纤维和聚烯烃纤维进行复合掺入，并

表3 混杂纤维力学性能及耐久性能研究

Tab.3 Study on mechanical and durability properties of hybrid fibers

文献	混掺纤维种类	力学实验	力学性能变化
崔涛涛等[64]	钢纤维、聚丙烯纤维	单轴压缩	最优掺量：钢纤维2.0%+聚丙烯纤维0.2%，相较于单掺2.0%钢纤维和单掺0.2%聚丙烯纤维，初始弹性模量提高0.3%和9.2%，峰值应力提高了2.8%和13.6%，峰值应变提高了10.5%和13.5%
Wu等[67]	钢纤维、聚乙烯醇纤维	劈裂抗拉、单轴压缩、收缩、抗裂	最优掺量：钢纤维1.0%+聚乙烯醇纤维0.2%，相较于单掺1.0%钢纤维，弹性模量提高了22.6%、收缩率减少56.5%、抗裂性能提升19.3%
尹机会等[68]	钢纤维、聚丙烯腈纤维	单轴压缩、劈裂抗拉	最优掺量：钢纤维40 kg/m^3+聚丙烯腈纤维2.1 kg/m^3，相较于单掺40 kg/m^{3}钢纤维，抗压强度提高3.4%，劈拉强度提高18.9%
熊小斌等[65]	钢纤维、聚丙烯腈纤维	单轴压缩、相对动弹性模量	最优掺量：钢纤维30 kg/m^3+聚丙烯腈纤维0.5 kg/m^3，在200次冻盐循环下，相对动弹性模量降低了13.72%，抗压强度降低了17.08%；而普通混凝土分别降低了36.89%、32.37%
王春生等[69]	钢纤维、共聚甲醛纤维	三点弯曲	最优掺量：钢纤维1.5%+共聚甲醛纤维1.5%，相较于单掺3%钢纤维，扩展度降低了17.9%，开裂挠度增加了16.7%，抗弯强度与弯曲韧性基本一致
Song和Yin[70]	钢纤维、碳纤维	轴心压缩、冲击	最优掺量：钢纤维1.0%+碳纤维0.2%，相较于普通混凝土，压缩韧性提高了95%，抗冲击性能提高222%

通过对收缩性、透水性、抗干裂、碳化和氯离子渗透性等指标进行对比，确定了较优掺量组合为1.2 kg/m³纤维素纤维、2.0 kg/m³聚乙烯醇纤维和2.0 kg/m³聚烯烃纤维。Teng等[72]通过氯离子快速迁移试验发现，在纤维总掺量一定的条件下，钢纤维与聚乙烯醇纤维的组合能够在一定程度上减缓氯离子渗透。Liu等[73]进一步指出，当玻璃纤维与聚乙烯醇纤维的混掺总量大于1.0%时，混凝土抵抗氯离子侵蚀的能力明显提高；其中，当混掺总量达到1.5%时，氯离子迁移深度和电荷量分别降低23.3%和20.15%，但当混掺总量超过2.0%后，抗氯离子侵蚀性能提升不再明显。综上，混杂纤维混凝土在兼顾强度、韧性和耐久性方面表现出较好的综合优势，具备作为输水隧洞高性能衬砌材料进一步研究和应用的可行性。

3.2.2　工程应用现状与发展方向

在实际隧道衬砌工程中，混杂纤维混凝土已表现出一定的应用潜力。Yang等[74]通过混掺1.092 kg/m³聚乙烯醇纤维和5 kg/m³仿钢纤维，改善了超厚冲积层冻结法钻进竖井衬砌混凝土的渗漏问题。崔光耀等[75]以九家湾断裂F2-3区间为背景，发现钢-玄武岩混杂纤维及钢-聚丙烯混杂纤维混凝土衬砌在主应力控制、纵向应变和抗错断能力方面均优于钢纤维混凝土衬砌，其中钢-聚丙烯混杂纤维衬砌的抗错断安全性更高。张恒等[76]基于ABAQUS对断层错动带隧道进行了数值模拟分析，结果表明，钢-聚丙烯混杂纤维混凝土衬砌能够有效提高结构抗错断能力。麻建飞等[77]依托某铁路隧道软硬围岩交接段，利用有限差分方法研究发现，采用钢-玄武岩混杂纤维混凝土衬砌后，横向位移、竖向位移、边墙收敛及安全系数等指标均得到不同程度改善。Wang等[78]以高黎贡山隧道为背景，通过模型试验和数值模拟研究表明，相比普通混凝土衬砌，钢-聚丙烯混杂纤维混凝土衬砌的初裂荷载、极限荷载及相应挠度均有所提高，对抑制围岩大变形具有积极作用。

目前，混杂纤维混凝土衬砌已在交通隧道、竖井、穿越断裂带隧道及大变形隧道等工程中表现出较好的应用效果，但其在输水隧洞衬砌中的系统研究仍相对不足。考虑到输水隧洞长期处于高内水压、水力侵蚀和复杂边界条件作用下，后续研究应进一步结合其特殊服役环境开展针对性工作。首先，可通过室内试验优选适用于输水环境的纤维组合与混杂比例，系统评价其力学性能、耐久性能及体积稳定性；其次，应建立能够反映水-力耦合作用下混杂纤维混凝土力学行为的本构模型，并发展相应的数值分析方法，以预测衬砌在施工期及服役期的受力响应与安全储备；再次，可依托典型输水隧洞工程开展示范应用，积累工程实践经验，并从全寿命周期角度评估其技术经济性。综上，混杂纤维混凝土有望在强度、韧性、耐久性与经济性之间实现更优平衡，为输水隧洞高性能衬砌材料的发展提供新的研究方向。

4　结论

本文围绕输水隧洞在高内外水压及复杂边界条件下的围岩-衬砌稳定性问题，系统梳理了现有混凝土衬砌材料的工程应用现状及纤维混凝土衬砌的研究进展，并分析了混杂纤维混凝土在提升衬砌综合性能方面的应用潜力。主要结论如下：

1）输水隧洞在高内外水压、软弱围岩、高地温及复杂地质构造等条件下，围岩-衬砌体系面临拉裂、渗透破坏、界面分离及局部失稳等风险，对衬砌材料的抗拉、抗裂、抗渗和耐久性能提出了较高要求。现有工程实践表明，喷射混凝土衬砌体系在围岩加固和结构支护中应用广泛，但普通混凝土在延性、韧性及抗拉性能方面仍存在明显不足。

2）聚丙烯纤维、钢纤维及其他纤维的掺入，能够在不同程度上改善混凝土的抗拉强度、韧性、抗裂性能及耐久性能。其中，聚丙烯纤维在早期裂缝控制和变形协调方面具有优势，钢纤维在提高承载力、韧性及残余强度方面表现更为突出，其他纤维则可在高温、抗冲击或抗渗等特定工况下发挥补充作用。但总体来看，单掺纤维混凝土在复杂输水环境下仍难以同时兼顾强度、韧性、耐久性及经济性。

3）针对单掺纤维混凝土在综合性能上的局限，混杂纤维混凝土表现出较好的发展潜力。通过合理组合不同类型纤维，可在增强、增韧、抗裂和耐久性改善等方面形成协同效应，从而有望实现衬砌材料高强度、高韧性和较好经济性的统一。因而，混杂纤维混凝土可作为输水隧洞高性能衬砌材料的重要发展方向，并值得在后续研究和工程实践中进一步深化。

参考文献：

[1]　王煜，郑小康，彭少明，等. 黄河流域水资源配置研究与展望[J]. 人民黄河，2024，46(9)：18-24.
Wang Y，Zheng X K，Peng S M，et al. Research and prospect of water resources allocation in the Yellow River

Basin[J]. Yellow River,2024,46(9):18-24.

[2] 吴险峰,陈庆伟,王冠,等. 南水北调从科学研究到工程实践的几个关键问题[J]. 地理学报,2023,78(7):1731-1743.
Wu X F,Chen Q W,Wang G,et al. Several key issues in the high-quality development of the South-to-North Water Diversion Project:From scientific research to engineering practice[J]. Acta Geographica Sinica,2023,78(7):1731-1743.

[3] 贾绍凤,梁媛. 调水工程研究评述与展望[J]. 地球科学进展,2023,38(3):221-235.
Jia S F,Liang Y. Commentaries on and prospects of the water diversion project[J]. Advances in Earth Science,2023,38(3):221-235.

[4] 徐宗学,庞博,冷罗生. 河湖水系连通工程与国家水网建设研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):757-764.
Xu Z X,Pang B,Leng L S. Research on the construction of river-lake system connectivity and national water network[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(4):757-764.

[5] 黄祥荣,黄鹄,宁天竹. 珠江三角洲水资源配置工程技术方案思考[J]. 中国给水排水,2022,38(24):1-7.
Huang X R,Huang G,Ning T Z. Introspects on the engineering technology scheme of water resources allocation in the Pearl River Delta[J]. China Water & Wastewater,2022,38(24):1-7.

[6] 吴国茂,曹军. 水工输水隧洞输水方式与技术经济分析[J]. 中国水运(下半月),2019(14):195-196.
Wu G M,Cao J. Water conveyance mode and technical and economic analysis of hydraulic water conveyance tunnel[J]. China Water Transport,2019(14):195-196.

[7] Zhu Y Y,Liu C. Study on the influence of internal water pressure on the internal force of circular hydraulic tunnel lining[J]. Applied Sciences,2022,12(21):11271.

[8] Xu Y Q,Bao T F,Yuan M D,et al. Analytical solution for lined circular water conveyance tunnels under the action of internal and external hydraulic pressure[J]. Applied Sciences,2024,14(17):7443.

[9] 王浩宇,李鹏飞,聂鼎. 水工隧洞衬砌混凝土多尺度开裂机理及防裂技术研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(12):27-40.
Wang H Y,Li P F,Nie D. Advance of research on multi-scale cracking mechanism and anti-cracking technology of hydraulic tunnel lining concrete[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences),2024,43(12):27-40.

[10] 金俊超,景来红,宋志宇,等. 高内压作用下混凝土衬砌渗流-应力-开裂分析[J]. 岩土工程学报,2025,47(12):2517-2527.
Jin J C,Jing L H,Song Z Y,et al. Seepage-stress-cracking analysis of concrete lining under high internal pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2025,47(12):2517-2527.

[11] 刘文博,曹立,周辉,等. 活动断裂带引水隧洞围岩蠕滑机制及围岩-衬砌结构力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(增刊2):3923-3935.
Liu W B,Cao L,Zhou H,et al. Study on creep mechanism of surrounding rock and mechanical response of surrounding rock-lining structure of diversion tunnel in active fault zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(S2):3923-3935.

[12] Li F,Chang N D,Wang J H,et al. Research on the algorithm for composite lining of deep buried water conveyance tunnel[J]. Advances in Civil Engineering,2021,2021:6686360.

[13] 刘宜杰,黄本胜,袁明道,等. 高内水压作用下围岩-叠合式衬砌承载机理力学分析[J]. 长江科学院院报,2024,41(10):140-148.
Liu Y J,Huang B S,Yuan M D,et al. Mechanical analysis of bearing mechanism of surrounding rock and multi-layer lining under high inner hydraulic pressure[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2024,41(10):140-148.

[14] Zhou Y F,Su K,Wu H G. Hydro-mechanical interaction analysis of high pressure hydraulic tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2015,47:28-34.

[15] Jin J C,Jing L H,Song Z Y,et al. Hydro-mechanical modeling of cohesive crack propagation of concrete lining in high internal pressure tunnels[J]. International Journal of Solids and Structures,2025,306:113108.

[16] 刘仲秋,章青. 岩体中饱和渗流应力耦合模型研究进展[J]. 力学进展,2008,38(5):585-600.
Liu Z Q,Zhang Q. A review on the state of art of the saturated seepage-stress coupling models in rock mass[J]. Advances in Mechanics,2008,38(5):585-600.

[17] 吴世勇,任旭华,陈祥荣,等. 锦屏二级水电站引水隧洞围岩稳定分析及支护设计[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(20):3777-3782.
Wu S Y,Ren X H,Chen X R,et al. Stability analysis and supporting design of surrounding rocks of diversion tunnel for Jinping hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(20):3777-3782.

[18] Yang F J,Zhou H,Zhang C Q,et al. An analysis method for evaluating the safety of pressure water conveyance tun-

nel in argillaceous sandstone under water-weakening conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2020,97:103264.

[19] Chen Y, Wang Y Z, Zhang Q Y. Coupled seepage-elastoplastic-damage analysis of saturated porous media and its application to water conveyance tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 44: 80-87.

[20] Azhar M U,周辉,杨凡杰,等. 软弱泥质砂岩地层中输水隧洞稳定性研究(英文)[J]. 岩土力学,2022(增刊2):626-639.
Azhar M U, Zhou H, Yang F J, et al. Stability of a water diversion tunnel in weak sandstone stratum [J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43 (S2):626-639.

[21] 朱艳丽. 南水北调西线工程深埋隧洞软岩变形的初步研究[D]. 南京:河海大学,2006.
Zhu Y L. Preliminary study on soft rock deformation of deep-buried tunnel in Western Route of South-to-North Water Diversion Project[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.

[22] 周泽林,陈寿根,李岩松. 深埋引水隧洞软弱围岩支护结构受力特征研究[J]. 现代隧道技术,2015,52(2):36-43.
Zhou Z L,Chen S G,Li Y S. Study of the mechanical characteristics of the support structure of a deeply buried diversion tunnel in soft rock[J]. Modern Tunnelling Technology,2015,52(2):36-43.

[23] 彭立锋,苏国韶,胡小川,等. 高地温水工高压隧洞结构模型试验研究[J]. 水力发电学报,2019,38(3):203-217.
Peng L F,Su G S,Hu X C,et al.Structural model tests of high-pressure hydraulic tunnels under high geotemperature conditions[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019,38(3):203-217.

[24] Yao X C,Li N,Wan K C,et al. Experimental and analytical study on mechanical properties of high rock temperature diversion tunnel[J]. Advances in Civil Engineering, 2019,2019:9537153.

[25] 后雄斌,姜海波,貊祖国. 高地温引水隧洞围岩热——应力耦合分析[J]. 水利水电技术,2017,48(7):43-48.
Hou X B,Jiang H B,Mo Z G. Analysis on thermo-stress coupling of surrounding rock for water diversion tunnel under high ground temperature[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2017,48(7):43-48.

[26] Zhang J,Wang M X,Xi C H. Tunnel collapse mechanism and its control strategy in fault fracture zone[J]. Shock and Vibration,2021,2021:9988676.

[27] 李凌子,肖明. 引水隧洞破碎带超前固结灌浆效果分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(2):97-104.
Li L Z,Xiao M. Analysis of the effects of advanced consolidation grouting on water diversion tunnels in fractured zones[J]. Modern Tunnelling Technology,2015,52(2):97-104.

[28] Zhang M C,Yan T Y,Cui Z,et al. Mechanical response study of a cross-fault water conveyance tunnel under the combined action of faulting dislocation and seismic loading[J]. Water,2024,16(20):2876.

[29] 罗涛,王大川,王灿. 引汉济渭大型深埋无压隧洞断面优化设计[J]. 人民黄河,2014,36(12):97-100.
Luo T,Wang D C,Wang C. Large deeply-buried and free-flow tunnel section optimization design of Hanjiang-to-Weihe River water diversion project[J]. Yellow River, 2014,36(12):97-100.

[30] 王克忠,刘耀儒,王玉培,等. 引水隧洞复合支护钢拱架变形特性及围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(2):217-224.
Wang K Z,Liu Y R,Wang Y P,et al.Study of deformation characteristics of compound support steel arch and surrounding rock stability in diversion tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(2):217-224.

[31] 刘祥恒,朱多一. 河南宝泉电站引水洞Ⅳ~Ⅴ类围岩开挖[J]. 人民长江,2004,35(6):21-22.
Liu X H,Zhu D Y. Type Ⅳ-Ⅴ surrounding rock excavation of water diversion tunnel of Baoquan hydropower station in Henan Province[J]. Yangtze River,2004,35(6):21-22.

[32] 阎忠. 南水北调中线吴庄隧洞工程设计要点[J]. 水科学与工程技术,2014(2):66-68.
Yan Z. Analysis of Wuzhuang tunnel engineering designing points in south-north water diversion project [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2014(2):66-68.

[33] 郑强,徐鹏飞. 乌弄龙水电站引水隧洞开挖施工技术[J]. 人民长江,2017,48(S1):196-198.
Zheng Q, Xu P F. Excavation construction technology of diversion tunnel of Wunonglong Hydropower Station[J]. Yangtze River,2017,48(S1):196-198.

[34] 段福荣,皮奇志,欧建广,等. 钢纤维喷混凝土在引水隧洞永久支护中的应用[J]. 人民长江,2007,38(5):45-46.
Duan F R, Pi Q Z, Ou J G, et al. Application of steel fibre shotcrete in permanent support of water diversion tunnel[J]. Yangtze River,2007,38(5):45-46.

[35] Wang H Y,He X J,Zhou M,et al. Study on bending failure and crack characteristics in ductile fiber-reinforced

concrete beams[J]. Structural Concrete, 2024, 25(2): 916-934.

[36] Shen D J, Liu X Z, Zeng X, et al. Effect of polypropylene plastic fibers length on cracking resistance of high performance concrete at early age[J]. Construction and Building Materials, 2020, 244: 117874.

[37] Saradar A, Tahmouresi B, Mohseni E, et al. Restrained shrinkage cracking of fiber-reinforced high-strength concrete[J]. Fibers, 2018, 6(1): 12.

[38] Xin C L, Wang Z Z, Zhou J M, et al. Shaking table tests on seismic behavior of polypropylene fiber reinforced concrete tunnel lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 88: 1-15.

[39] 梁宁慧,周侃,毛金旺,等. 多尺度聚丙烯纤维混凝土在隧道二衬中的应用[J]. 公路交通科技, 2023, 40(9): 158-165.
Liang N H, Zhou K, Mao J W, et al. Application of multi-scale polypropylene fiber concrete in secondary lining of tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(9): 158-165.

[40] 徐子瑶,虞松,付强,等. 地铁喷浆用纤维增强混凝土的试验研究与数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 554-563.
Xu Z Y, Yu S, Fu Q, et al. Experimental study and numerical simulation of fiber reinforced concrete subway shotcrete [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 554-563.

[41] Ren L X, Wei Z F, Liang N H, et al. Mechanical behavior of multi-scale fiber-reinforced concrete for secondary tunnel lining: Field test and numerical simulation[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01669.

[42] Behfarnia K, Behravan A. Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels[J]. Materials & Design, 2014, 55: 274-279.

[43] 杨示文,全燕文. 龙滩地下引水发电系统聚丙烯纤维喷射混凝土施工[J]. 红水河, 2004, 23(4): 39-42.
Yang S W, Quan Y W. Sprayed concrete construction with polypropylene for the underground diversion system of Longtan Project[J]. Hongshui River, 2004, 23(4): 39-42.

[44] 官林星,温竹茵,王晓鹏,等. 粗合成纤维在排水调蓄盾构法隧洞管片中的应用试验研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(6): 258-265.
Guan L X, Wen Z Y, Wang X P, et al. Test and study on the application of synthetic macro-fibers in the segments of drainage and storage tunnels built by shield method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(6): 258-265.

[45] 薛晓飞. 聚丙烯纤维对高岩温输水隧洞喷射混凝土力学性能的影响[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(12): 139-143.
Xue X F. Effect of polypropylene fiber on mechanical properties of shotcrete in high rock temperature water conveyance tunnel[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2022, 28(12): 139-143.

[46] Park J J, Yoo D Y, Park G J, et al. Feasibility of reducing the fiber content in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under flexure[J]. Materials, 2017, 10(2): 168.

[47] Yu Y, Xu J J, Chen W S, et al. Mesoscale modeling of flexural fracture behavior in steel fiber reinforced concrete[J]. Advances in Structural Engineering, 2024, 27(4): 565-584.

[48] Zhang J, Li V C. Simulation of crack propagation in fiber-reinforced concrete by fracture mechanics [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 333-339.

[49] 刘新荣,祝云华,李晓红,等. 隧道钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2319-2323.
Liu X R, Zhu Y H, Li X H, et al. Experimental research on single-layer tunnel lining of steel fiber shotcrete [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2319-2323.

[50] 崔光耀,宋博涵,王道远,等. 隧道软硬围岩交界段纤维混凝土衬砌抗震性能模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2653-2662.
Cui G Y, Song B H, Wang D Y, et al. Model test study on seismic performance of fiber reinforced concrete lining at the junction of soft and hard surrounding rock of tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2653-2662.

[51] 安栋,刘天旺,郭艳军. 强震区跨断层隧道纤维混凝土衬砌抗震效果分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(6): 98-103.
An D, Liu T W, Guo Y J. Analysis on seismic effect of fiber concrete lining in cross-fault tunnel at strong earthquake area[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(6): 98-103.

[52] 陈赤坤,杨建民,潘鹏,等. 下穿铁路的承压引水隧洞设计[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(6): 60-63.
Chen C K, Yang J M, Pan P, et al. Design of compression seepage tunnel underpass railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 24(6): 60-63.

[53] 湛正刚,王刚,赵继勇. 洪家渡水电站水工隧洞设计与施工[J]. 水力发电, 2001, 27(9): 20-21.
Zhan Z G, Wang G, Zhao J Y. Design and construction of hydraulic tunnel of Hongjiadu Hydropower Station[J]. Water Power, 2001, 27(9): 20-21.

[54] 周文鼎,张冬梅,姜燕,等. 钢筋钢纤维混凝土内衬受内水压计算模型[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1):

335-342.
Zhou W D, Zhang D M, Jiang Y, et al. Calculation model of steel fiber reinforced concrete inner lining subjected to internal water pressure[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 335-342.

[55] 唐斌,胡建立. 钢纤维喷射混凝土在瀑布沟水电站导流洞工程中的应用[J]. 水电站设计,2005,21(2):43-44.
Tang B, Hu J L. Application of steel fiber shotcrete in pubugou hydroelectric power station diversion tunnel project[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2005, 21(2): 43-44.

[56] Li C C, Mo Z G, Jiang H B, et al. Analysis of the stability and mechanical characteristics of the jointed surrounding rock and lining structure of a deeply buried hydraulic tunnel[J]. Fluid Dynamics & Materials Processing, 2022, 18(1): 29-39.

[57] 宁逢伟,陈波,张丰,等. PVA纤维掺量对水工混凝土抗裂性能的影响[J]. 水利水电技术,2017,48(2):125-129.
Ning F W, Chen B, Zhang F, et al. Influence of PVA fiber proportion on anti-cracking performance of hydraulic concrete[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 125-129.

[58] 钟卫杰,李镇云. 聚丙烯腈纤维在水工隧洞喷射混凝土施工中的应用[J]. 建材与装饰,2018(42):286-287.
Zhong W J, Li Z Y. Application of polyacrylonitrile fiber in shotcrete construction of hydraulic tunnel[J]. Construction Materials & Decoration, 2018(42): 286-287.

[59] 张岩,李宁,张浩博,等. 温差影响下水工隧洞喷层结构的早期劈拉强度试验研究[J]. 水力发电学报,2014,33(2):221-229.
Zhang Y, Li N, Zhang H B, et al. Experimental study on early splitting strength of hydraulic tunnel shotcrete layer under temperature differences[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 221-229.

[60] 邓志云,林鹏,马翔,等. 深埋隧洞纤维混凝土衬砌支护特性及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版),2025,65(3):495-508.
Deng Z Y, Lin P, Ma X, et al.Support characteristics and application of fiber-reinforced concrete lining for deep-buried tunnels[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2025, 65(3): 495-508.

[61] Lin J X, Luo R H, Su J Y, et al. Coarse synthetic fibers (PP and POM) as a replacement to steel fibers in UHPC: Tensile behavior, environmental and economic assessment[J]. Construction and Building Materials, 2024, 412: 134654.

[62] Ali B, Ali Qureshi L, Kurda R. Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement[J]. Composites Communications, 2020, 22: 100437.

[63] Zargaran M, Attari N K A, Alizadeh S. Flexural behavior of high-performance and non-high-performance textile reinforced concrete composites[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, 27(2): 893-907.

[64] 崔涛涛,宁宝宽,郜殿伟,等. 混杂纤维高强轻骨料混凝土单轴受压试验研究[J]. 材料导报,2024,38(2):126-131.
Cui T T, Ning B K, Gao D W, et al. Experimental study on hybrid fiber high strength lightweight aggregate concrete under uniaxial compression[J]. Materials Reports, 2024, 38(2): 126-131.

[65] 熊小斌,王瑞骏,李阳,等. 单掺和混掺纤维面板混凝土抗盐冻耐久性试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(3):173-178.
Xiong X B, Wang R J, Li Y, et al. Experimental study on salt-freezing durability of single and mixed fiber-doped panel concrete[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(3): 173-178.

[66] 徐礼华,梅国栋,黄乐,等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土轴心受拉应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报,2014,47(7):35-45.
Xu L H, Mei G D, Huang L, et al.Study on uniaxial tensile stress-strain relationship of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(7): 35-45.

[67] Wu J J, Zhang W J, Han J H, et al. Experimental research on crack resistance of steel-polyvinyl alcohol hybrid fiber-reinforced concrete[J]. Materials, 2024, 17(13): 3097.

[68] 尹机会,丁一宁,Niederegger C,等. 混杂纤维混凝土劈拉性能试验研究[J]. 混凝土,2007(3):11-13.
Yin J H, Ding Y N, Niederegger C, et al. Experimental study on the behavior of hybrid fiber reinforced concrete under splitting tension[J]. Concrete, 2007(3): 11-13.

[69] 王春生,张洋,段兰. 共聚甲醛纤维超高性能水泥基复合材料抗弯性能试验[J]. 复合材料学报,2024,41(1):373-382.
Wang C S, Zhang Y, Duan L. Flexural performance of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composite material doped with copolymer formaldehyde fiber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(1): 373-382.

[70] Song W M, Yin J. Hybrid effect evaluation of steel fiber

and carbon fiber on the performance of the fiber reinforced concrete[J]. Materials,2016,9(8):704.

[71] Xu H Y,Wang Z J,Shao Z M,et al. Experimental study on durability of fiber reinforced concrete:Effect of cellulose fiber,polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber[J]. Construction and Building Materials,2021,306:124867.

[72] Teng S,Afroughsabet V,Ostertag C P. Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials,2018,182:504-515.

[73] Liu J L,Jia Y M,Wang J. Experimental study on mechanical and durability properties of glass and polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Fibers and Polymers,2019,20(9):1900-1908.

[74] Yang L,Yao Z S,Xue W P,et al. Preparation,performance test and microanalysis of hybrid fibers and microexpansive high-performance shaft lining concrete[J]. Construction and Building Materials,2019,223:431-440.

[75] 崔光耀,王李斌,王明年,等.隧道纤维混凝土衬砌抗错断性能模型试验研究[J].振动与冲击,2019,38(13):50-56.
Cui G Y,Wang L B,Wang M N,et al. Model tests for anti-breaking performance of a fiber reinforced concrete tunnel lining[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(13):50-56.

[76] 张恒,冯贤庆,姬广军,等.钢-聚丙烯纤维混凝土衬砌与组合抗震缝抗错断性能研究[J].世界地震工程,2024,40(4):76-86.
Zhang H,Feng X Q,Ji G J,et al. Study on the anti-fault performance of steel-polypropylene fiber concrete lined tunnel with composite seismic joint[J]. World Earthquake Engineering,2024,40(4):76-86.

[77] 麻建飞,郭艳军,崔光耀.强震区隧道软硬围岩交接段纤维混凝土衬砌抗震性能研究[J].高速铁路技术,2020,11(5):46-50.
Ma J F,Guo Y J,Cui G Y.Seismic performance of fiber concrete lining at soft and hard surrounding rock junction of tunnel in highly seismic area[J]. High Speed Railway Technology,2020,11(5):46-50.

[78] Wang H B,Feng T G,He Y Y,et al. Fracture toughness of steel-polypropylene hybrid fibre reinforced shotcrete and its feasibility in squeezing tunnels[J]. Construction and Building Materials,2025,489:142353.

(编辑 许军策)