文章编号:2096-5052(2026)03-0010-13　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.02

隧道衬砌结构抗火技术研究现状综述

许为民[1],张绍绮[2*],沈奕[2],闫治国[2]
(1. 济南城市建设集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:为明确隧道衬砌在火灾下的损伤机理与抗火性能,系统梳理了近年来国内外隧道衬砌抗火技术的研究进展,为隧道工程抗火设计与安全保障提供参考。通过综合分析相关文献与工程案例,重点总结混凝土火灾剥落机理、衬砌结构高温性能演化规律、现有抗火措施的特点与局限以及未来发展趋势。分析表明,混凝土高温剥落主要由蒸汽压力、热应力及热开裂共同作用所致,其高温性能呈现明显的热工与力学性能退化。传统抗火措施如被动防火、材料改性与构造增强虽应用广泛,但普遍存在耐久性差、维护成本高及防火与承载功能不协同等问题。新兴的微胶囊自抗火混凝土技术和智能预警与孪生技术,前者通过内置微胶囊与混杂纤维的协同实现结构火灾下的自主防护,后者以人工智能与数字孪生为核心赋予结构感知预警能力,代表抗火技术向智能化、自防护、一体化方向发展的新趋势。

关键词:隧道衬砌结构;抗火措施;剥落机理;高温性能
中图分类号:U458.1; U455.4　　**文献标志码**:A

引用格式:许为民,张绍绮,沈奕,等. 隧道衬砌结构抗火技术研究现状综述[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):10-22. Xu Weimin, Zhang Shaoqi, Shen Yi, et al. Review of the research status of fire resistance technologies for tunnel lining structures[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):10-22.

Review of the research status of fire resistance technologies for tunnel lining structures

Xu Weimin[1], Zhang Shaoqi[2*], Shen Yi[2], Yan Zhiguo[2]
(1. Jinan City Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China;
2. Department of Geotechnical Engineering College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To clarify the damage mechanisms and fire resistance performance of tunnel linings under fire exposure, recent research progress in fire resistance technologies for tunnel linings was systematically reviewed, aiming to provide a reference for fire-resistant design and safety assurance in tunnel engineering. Through a comprehensive analysis of relevant literature and engineering case studies, four key aspects were summarized: concrete spalling mechanisms under fire conditions, evolution of high-temperature performance of lining structures, characteristics and limitations of existing fire resistance measures, and future development trends. The analysis indicated that fire-induced concrete spalling was primarily attributed to the coupled effects of vapor pressure, thermal stress, and thermal cracking, while the high-temperature performance of linings exhibited significant thermal and mechanical degradation. In addition, traditional fire resistance measures, including passive fire protection, material modification, and structural reinforcement, were widely adopted but commonly suffered from poor durability, high maintenance costs, and a lack of synergy between fire resistance and load-bearing functions. Furthermore, two emerging technologies were highlighted: microencapsulated self-fire-resistant concrete, which achieved autonomous structural protection under fire conditions through the synergistic action of embedded microcapsules and hybrid fibers, and intelligent early warning and digital twin technology, which endowed linings with sensing and early warning capabilities through artificial intelligence and digital twins. These emerging

收稿日期:2026-04-17;**修回日期**:2026-08-16;**接受日期**:2026-08-20;**出版日期**:2026-09-20
基金项目: 济南济泺路穿黄隧道工程科研资助项目(TSYSDY-JLLCHSD[2020]-10)
第一作者简介: 许为民(1966—),男,上海人,正高级工程师,主要研究方向为城市道路与交通工程。E-mail: xwm2777@126.com
*通信作者简介: 张绍绮(1997—),女,山东济宁人,博士研究生,主要研究方向为低碳隧道材料火灾安全性能。
E-mail: zhangshaoqi@tongji.edu.cn

technologies represented a new trend toward intelligent, self-protective, and integrated fire resistance strategies.
Keywords: tunnel lining structure; fire resistance measures; spalling mechanisms; high-temperature performance
Received:2026-04-17; **Revised**:2026-08-16; **Accepted**:2026-08-20; **Published**:2026-09-20

0　引言

随着我国交通基础设施的快速发展,隧道在城市交通与越江跨海工程中扮演着日益重要的角色。然而,近年来隧道数量的快速增长也导致隧道火灾事故频发。由于隧道空间相对封闭,火灾发生时往往呈现出峰值温度高(可达 1 000 ℃以上)、升温速率快、持续时间长以及温度分布不均匀等特征[1-3],不仅严重威胁人员的生命安全,造成重大财产损失,也对隧道衬砌结构造成严重损伤,甚至引发不可逆的结构破坏[4-5]。例如,1996 年英法海峡隧道火灾造成衬砌严重损坏,其中心断面混凝土厚度由 45 cm急剧剥落至仅 4 cm[6];2014 年山西晋济高速岩后隧道火灾持续燃烧 73 h,导致 40 人死亡、42 辆车烧毁,衬砌结构遭受毁灭性损伤,充分暴露出隧道结构在极端火灾下的脆弱性。

火灾对衬砌结构的损伤机理主要表现为热量以热辐射与热对流形式传递至衬砌表面,再通过热传导在结构内部形成高温、梯度大的非稳态温度场。这不仅诱发混凝土爆裂和材料力学性能劣化,还会引起热应力集中与结构变形累积,最终导致隧道衬砌结构整体性丧失与承载力显著下降[7-8]。同时,火灾释放的有毒烟气及所造成的氧气浓度降低,也对隧道内行车人员的生命安全构成严重威胁,给隧道工程的建设与安全运营带来严峻挑战[9]。因此,提升衬砌结构的抗火性能,是保障隧道结构稳定与运营安全的关键所在。基于此,本研究系统梳理隧道衬砌结构抗火技术的研究进展,重点围绕混凝土火灾剥落机理、衬砌结构高温性能以及现有防火措施进行总结与分析,进一步归纳不同类型隧道衬砌差异化抗火策略,并对未来发展自防护、智能化、一体化的新型抗火技术方向提出展望,以期为我国隧道工程的火灾安全设计与实践提供参考。

1　隧道混凝土火灾剥落机理

明确隧道衬砌混凝土在火灾高温作用下的剥落机理是提升隧道结构抗火性能的关键。目前,学术界对混凝土高温剥落机理已形成 3 种主流理论解释:蒸汽压机理、热应力机理及热开裂机理。

1.1　蒸汽压机理

蒸汽压机理认为,高温作用下混凝土内部水分会转化为水蒸气,由于混凝土基体内部致密性较高,水蒸气难以快速逸出,导致孔隙压力急剧上升。当孔隙压力超过混凝土抗拉强度时,即引发爆裂破坏[10-11]。研究表明,混凝土初始含水率越高,内部蒸汽压积聚越快,爆裂风险增大[12]。蒸汽压机理的核心在于“湿阻效应”,即火灾高温时,水蒸气根据截面上形成的温度和压力梯度向构件内部或外部移动,根据混凝土的渗透性,一部分水蒸气通过加热表面逸出,其余部分流向混凝土内部较冷的区域,再次凝结成液态水。随着火灾暴露时间的延长,混凝土内的干燥、水分迁移和蒸汽冷凝过程导致其在受热表面一定距离处形成饱和层,造成“水汽堵塞”。这种堵塞防止水蒸气进一步向内部区域迁移,导致混凝土加热表面附近的孔隙(蒸汽)压力积聚,产生较大的局部拉应力,当其超过混凝土抗拉强度时则导致爆裂破坏,如图 1 所示[13]。研究发现,掺加低熔点的聚合物纤维,如聚丙烯(polypropylene, PP)纤维、聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维,聚乙烯(polyethylene, PE)纤维,是缓解此问题的有效途径,主要归因于纤维在高温熔融后可形成蒸汽逸散通道,显著降低爆裂概率[14]。研究表明,掺入 0.15%~2%的 PP 纤维或 PVA 纤维可有效缓解超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)的高温爆裂[9]。

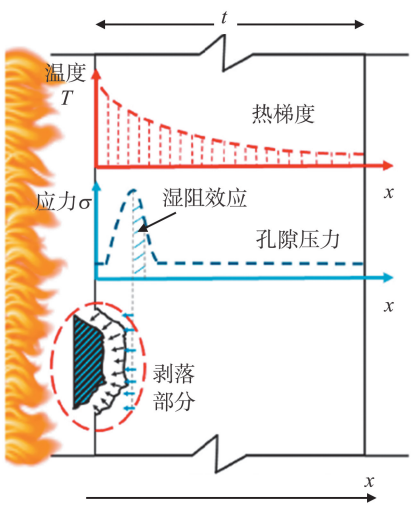


图 1　蒸汽压机理示意图[13]
Fig.1　Schematic diagram of vapor pressure mechanism[13]

1.2 热应力机理

热应力机理认为,爆裂是由于温度应力导致的混凝土破坏[15]。混凝土作为热惰性材料,导热系数低而比热高,靠近混凝土受热表面的外层升温速率比远离火灾高温的内层升温速率快得多。外部和内部混凝土层之间的温度差导致混凝土横截面上出现较大的温度梯度,从而导致较热部分的不均匀膨胀,但由于其受到较冷区域的抑制,在混凝土内部产生显著的热应力,造成与受热表面平行的压应力和垂直方向的拉应力。当受热混凝土表面的压应力产生横向拉应力,且超过材料抗拉强度时,混凝土试件发生脆性断裂,如图 2 所示[13]。有学者认为,混凝土的爆裂是由热应力和蒸汽压力共同导致,而在混凝土表面涂覆防火涂料可有效减缓热量传递,降低温度梯度,从而减轻热应力引起的破坏[16]。

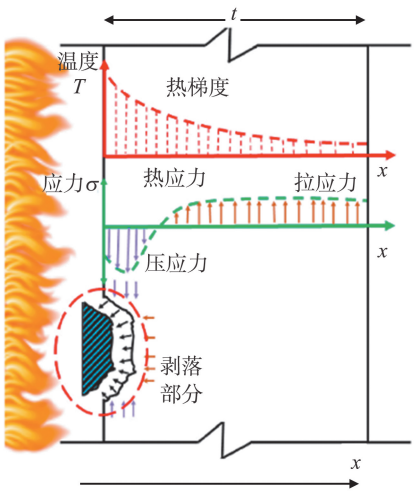


图 2 热应力机理示意图[13]

Fig.2 Schematic diagram of thermal stress mechanism[13]

1.3 热开裂机理

热开裂机理认为,混凝土的高温爆裂与其内部热开裂有关。混凝土是一种多相复合材料,其水泥浆体与骨料间热力学参数(如热膨胀系数、导热率)的差异是导致高温破坏的内在原因。火灾高温下,各组分膨胀变形不协调,在界面过渡区产生应力集中,引发径向和环向微裂纹[17-18]。一方面,这些微裂缝可为内部水蒸气逸出提供通道。在快速升温阶段,裂缝数量与蒸汽压力同步增长,当裂缝发展导致的渗透性提升足以有效释放蒸汽压力时,混凝土发生爆裂的风险有所降低。另一方面,这些微裂纹随温度升高不断扩展、贯通成宏观裂纹,裂缝的持续积累削弱了混凝土的力学强度[19]。因此,有学者认为热开裂与蒸汽压力的耦合作用是导致混凝土爆裂的关键[9]。

值得注意的是,学术界对 3 种机理的主次关系仍存在争议。部分学者认为蒸汽压是诱导爆裂的首要因素,而热应力起到加剧作用;另一些研究则指出,在快速升温条件下,热应力可能先于蒸汽压达到临界值。目前较为共识的观点是:在实际火灾中,混凝土剥落往往是上述 3 种机理共同作用的结果。蒸汽压与热应力的耦合效应尤为显著——孔隙压力增大了混凝土内部的拉应力水平,而温度梯度则加速了水分迁移和蒸汽生成。理解这些机理的相互作用,对于发展有效的隧道衬砌抗火技术具有重要意义。

2 隧道衬砌结构火灾高温性能

2.1 隧道混凝土材料高温性能

混凝土在高温作用下的性能劣化是隧道衬砌结构抗火性能研究的核心问题。随着温度升高,混凝土材料表现出显著的热工性能和力学性能变化。

2.1.1 热工性能演化规律

混凝土在高温下的热工性能极大地影响了其抗火性能。Khaliq 等[20]通过系统试验发现,自密实混凝土的导热系数随温度升高而持续下降,而比热容和热膨胀系数则呈上升趋势。值得注意的是,混杂纤维(钢纤维+聚丙烯纤维)的掺入使混凝土在 1 000 ℃时的热膨胀系数比普通混凝土提高 30%以上,这对衬砌结构的热应力分布产生显著影响。此外,超高性能混凝土(UHPC)表现出独特的热工特性。Kodur 等[21]研究表明,与传统混凝土相比,UHPC在高温下具有更高的导热系数和热膨胀系数,但在 600 ℃以上出现传热特性反常上升现象,这与粗骨料含量和水分迁移密切相关。而 Li 等[22]对超高韧性混凝土的研究则发现,由于粗骨料缺失和高掺量聚合物纤维的作用,其高温导热系数(约 0.5 W/m·K)远低于普通混凝土,这一特性为优化衬砌温度场分布提供了新思路。

2.1.2 力学性能退化机理

高温下混凝土的力学性能显著劣化,呈现出明显的阶段性特征。Chan 等[23]将混凝土强度损失划分为 3 个温度区间:20~400 ℃范围内性能变化相对平缓;400 ℃以上出现显著劣化;800 ℃以上强度急剧下降。Fu 等[24]研究则揭示了混凝土的高温退化机理,即水泥浆体与骨料热膨胀系数不匹配所产生的内应力、孔隙压力积聚以及水化产物的分解共同

导致了材料的损伤。

值得注意的是,荷载条件对混凝土高温力学性能的影响存在研究分歧。此外,在实际工程中混凝土常受到其他构件的约束,从而导致在升温过程中同时受到压力荷载的作用。大量研究表明[25-28],预压应力作用下的混凝土高温抗压强度比无应力状态提高 5%~30%。这种“约束增强效应”可能源于预压应力限制了裂纹自由扩展以及导致水泥浆体更加密实。然而,Petkovski[29]的研究对此提出了不同见解,发现在特定应力水平下,预压应力可能加速高温损伤。这一争议表明,约束效应与材料损伤演化之间存在复杂的非线性关系,需根据具体的应力水平和温度区间进行区分。在实际隧道衬砌中,结构受到周围岩土体的约束,明确约束条件对高温力学性能的影响机制,是准确评估衬砌火灾承载力的前提。

2.2　隧道衬砌结构高温响应

2.2.1　温度场分布特征

隧道火灾因其狭长密闭的空间结构,热量积聚迅速,通常在起火几分钟内温度可达到 1 000 ℃以上。试验研究表明,衬砌结构在火灾作用下的温度场呈现出明显的三维非均匀分布特征:拱顶区域温度最高,沿隧道纵向和衬砌厚度方向呈指数规律衰减[30-32]。此外,隧道火灾的诱因多样,燃料类型亦不尽相同,不同火灾场景下的温度-时间曲线存在显著差异。目前国内外常用的标准火灾曲线包括 ISO 834 标准升温曲线、HC(hydrocarbon curve)火灾曲线、荷兰 RWS 火灾曲线、德国 RABT/ZTV 火灾曲线及挪威 Runehamer 火灾曲线[33-34],如图 3 所示。

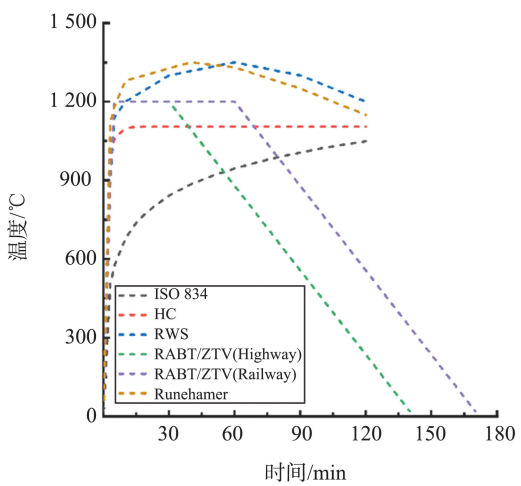


图 3　标准火灾曲线图

Fig.3　Standard fire curves

由图 3 可知,HC 曲线、RWS 曲线和 Runehamer 曲线在极短时间内可使衬砌表面加热至 1 100 ℃以上,产生巨大的热冲击,导致衬砌内部形成较大的温度梯度,造成混凝土和钢筋的强度与弹性模量急剧下降,表层混凝土爆裂风险较大。RABT 曲线同样具有快速升温阶段,但其高温持续时间相对较短,并引入降温阶段。冷却过程中,表面混凝土收缩受到内部约束,产生附加拉应力,可能导致裂缝扩展或产生新的收缩裂缝,增加结构损伤深度。ISO 834 曲线升温速率较慢,仅反映火灾温度的增长过程,对材料性能的劣化程度相对较轻,通常仅适用于小规模隧道火灾或作为构件耐火性能基准测试曲线。在我国隧道工程实践中,《公路隧道设计规范》[35]提出,抗火设计应综合考虑隧道类型、通风条件、交通量及潜在火灾规模等因素,选用适宜的标准火灾曲线,以支撑隧道结构的抗火设计与安全评估。我国隧道工程中常用火灾曲线类型及适用场景如表 1 所示。

表 1　我国隧道工程常用火灾曲线类型及适用场景

Table 1　Common fire curve types and applicable scenarios in tunnel engineering in China

曲线类型	曲线特征	适用场景
RABT 曲线	快速升温(0~5 min 达 1 200 ℃),高温持续短,含降温段	适用于普通卡车火灾
HC 曲线	快速升温(10 min 内达 1 200 ℃以上),持续高热	适用于烃类燃料火灾
RWS 曲线	快速升温(5 min 达 1 140 ℃),持续高热	适用于大型货车或多车火灾
ISO 834 标准曲线	缓速升温(30 min 达 800 ℃以上),温度相对较低	适用于火灾风险较低的隧道段
Runehamer 曲线	快速升温后持续高温,包含降温阶段	适用于重型货车火灾

2.2.2　结构变形

火灾高温作用下,隧道衬砌结构因材料性能劣化及温度应力而经历复杂的内力重分布过程,最终表现为宏观结构变形,受材料类型、结构形式及温度场分布共同影响。研究表明,不同材料衬砌的变形响应存在显著差异。沈奕等[36-37]对比了钢筋混凝土管片与混杂纤维混凝土管片的火灾响应,发现后者在抑制高温变形方面表现出更优性能。肖明清等[38]指出,在大直径盾构隧道中,接头张开量与径向位移随温度升高而显著增大,是控制结构整体稳

定性的关键。研究还发现,隧道火灾通常呈现非均匀温度分布,导致结构产生不对称变形。潘东[39]通过大直径隧道火灾试验发现,衬砌的最终变形是外部荷载与火灾高温共同作用的结果,且结构断面温度分布对其变形规律影响显著。王峰等[40]基于瞬态热应变模型,对火灾高温下衬砌结构的温度及变形规律进行了系统分析。在理论建模方面,Wang等[41]综合运用理论分析与数值模拟方法,对火灾隧道内的温度场、蒸汽压力场及湿度场进行系统研究,揭示了多物理场耦合作用下衬砌结构的响应特征。Yan 等[42]发展的多尺度损伤热弹性模型,为理解衬砌在热-力耦合作用下的变形机制提供了有效工具。进一步地,Pichler 等[43]和 Zhang等[44]建立了热-化学-力多场耦合数值模型,对实际浅埋隧道衬砌结构在火灾作用下的力学性能进行系统评估,推动了理论模型从热-力耦合向多物理场耦合的深化。此外,一些学者还通过精细化的大直径隧道衬砌三维模型,系统探讨了不同火灾曲线、二次衬砌施加时机及埋深条件对结构内力重分布的影响[45-47]。

2.2.3 破坏模式

隧道衬砌结构在火灾下的破坏模式具有典型特征。试验研究表明,破坏过程及形态受温度场分布、外部荷载水平及材料性能共同控制。Kim等[48]开展的荷载-温度耦合试验揭示,外部荷载水平对破坏形态具有显著影响:较高的荷载将加剧衬砌混凝土的剥落程度,并改变结构的最终破坏模式。Chang 等[49]采用 RABT 标准火灾曲线对隧道衬砌管片进行的模拟试验表明,管片爆裂深度最高可达 20 cm,显示出高温对衬砌截面的严重削弱。还有研究表明,通过开发多功能隧道衬砌结构原型试验系统,可实现全环衬砌结构在非均匀火灾场景下的力学行为观测。该试验系统不仅验证了自身的环境适应性,还揭示了大直径盾构隧道衬砌(内径 10.5 m)火灾后的破坏形态规律[50-51]。此外,在评估方法方面,新型数值与理论手段为准确预测破坏过程提供了支持。Choi等[52]采用单元消除法建立的有限元模型,能够更真实地模拟混凝土在高温下的剥落与脱水行为,提升了结构损伤演变的模拟精度。Qiao 等[53]提出的长时间火灾理论分析方法,为评估隧道在持续火灾下的安全性提供了新途径。

这些研究进展表明,隧道衬砌结构火灾高温性能的研究正从单一参数分析向多场耦合、多尺度方向发展,建立准确的材料本构关系和完善的理论分析方法,是提升隧道衬砌结构抗火设计水平的关键。然而,针对极端复杂工况(如高水压、大埋深等)下的多灾变机制研究仍存在显著空白。特别是当海底隧道或高水位山岭隧道发生火灾时,衬砌结构面临外部高水压渗透与内部高温热冲击的双重极端荷载夹击,其力学行为远比单一工况复杂。这种水-热-力强耦合作用下的结构破坏机理尚不清晰,还需开展深入研究。

3 隧道衬砌结构抗火措施

隧道衬砌结构的抗火安全是隧道工程全生命周期安全运营的关键环节。为减轻或避免火灾高温对衬砌结构的损伤,国内外研究与实践形成了多种抗火措施。根据技术原理与发展阶段,现有抗火措施可归纳为传统抗火技术与新型抗火技术。

3.1 传统抗火技术

3.1.1 被动防火措施

被动防火措施的核心是在衬砌结构表面设置物理屏障,通过隔热削弱火灾热荷载对主体结构的影响。

(1)防火板与防火喷涂料

防火板与防火喷涂料是目前应用最广泛的隧道防火措施。通过在衬砌表面设置隔热屏障,可有效降低混凝土表面升温速率,防止混凝土爆裂[54-55]。然而,该措施存在一定缺陷:防火层会遮挡衬砌表面,妨碍运营期对衬砌病害的检查监测;现有材料的耐久性难以满足工程全寿命期要求,通常需要 2~3 次更新,增加维护成本。此外,在隧道振动环境下,防火涂料易出现脱落失效。

(2)防火涂层新技术

防火涂层通过在混凝土表面形成隔热层,延缓热量传递,是提升结构耐火性能的有效手段。近年来,新型防火涂层材料发展迅速。例如,硅气凝胶类防火涂料凭借其极低的热导率(可低至 0.135 W/(m·K))和优异的耐高温性能(在 1 150 ℃下仍能保持稳定),展现出良好的应用前景[56-58]。研究表明,当硅气凝胶为 4% vol 时,10 mm 厚的涂层耐火极限可达 158 min[55]。尽管目前硅气凝胶材料因成本较高限制了其大规模工程应用,但其卓越的隔热性能预示着其是未来隧道防火涂层的重要发展方向。

(3)水喷淋系统

安装于衬砌表面的水喷淋系统,可通过喷水直

接冷却衬砌表面,从而有效降低混凝土温度并防止爆裂[59]。但该措施存在一定缺陷:其一,防火效果高度依赖于可靠、充足的水源和精确的水量控制,系统造价及后期维护费用高昂;其二,火灾时开启水喷淋会产生大量水蒸气,严重恶化隧道内的可见度与逃生环境,对人员安全构成威胁。

3.1.2　材料改性措施

(1)掺加纤维

在混凝土中掺加纤维是改善其高温性能,尤其是抑制高温爆裂的有效方法。PP 纤维、PVA 纤维等合成纤维是目前应用最广泛的纤维类型,其作用机理在于高温熔化后能在混凝土内部形成连通的孔隙通道,为内部水蒸气逸出提供路径,从而有效释放蒸汽压力,抑制爆裂[60-61]。研究表明,每立方米混凝土掺加约 1.5 kg 聚丙烯纤维可显著抑制高强混凝土的高温爆裂[14,62]。然而,聚丙烯纤维在燃烧时可能产生有毒气体,且对火灾后混凝土的残余承载力改善有限。

为了兼顾常温力学性能与高温抗爆裂性,混杂纤维技术近年来得到广泛应用。研究发现,钢纤维与聚丙烯纤维的混杂掺加表现出良好效果。钢纤维能改善混凝土韧性和残余强度,同时延缓剥落发生,而聚丙烯纤维则通过其熔融相变形成多孔通道,有效增加渗透性,防止爆裂发生[63-65]。钢纤维与聚乙烯醇纤维的混杂也可显著提高混凝土的残余抗压强度和抗弯强度[66]。此外,混杂纤维素-玄武岩纤维同样能改善混凝土 800 ℃后的残余抗压强度[67]。但较高掺量的植物纤维(如黄麻纤维)虽可形成附加缝隙抑制爆裂,其自身刚度较低,可能影响混凝土的力学强度[68-69]。因此,如何在保持混凝土优异力学性能的前提下提升其耐高温性能,仍是当前研究的难点。

(2)优化混凝土组分

通过选用热稳定性好、热膨胀系数低的骨料,以及在水泥基体中掺加矿渣、硅灰等矿物掺合料,可以改善混凝土的高温体积稳定性和抗爆裂性[70]。此外,近年来相变储能材料在混凝土抗火改性中的应用受到广泛关注。相变储能材料通过在特定温度区间发生相变吸收大量热量,显著提高了混凝土的热惰性,延缓了火灾环境下混凝土的升温速率,以保持结构的稳定性和完整性,从而有效提升结构的整体抗火性能[71]。然而,该方法在实际应用中仍面临材料性能与结构力学需求难以兼顾的挑战。例如,相变材料的掺入可能导致混凝土强度和工作性能的下降,存在一定受力破坏风险,因此其掺量、封装形式及与基体材料的相容性仍需进一步研究优化。

3.1.3　构造增强措施

(1)预设混凝土牺牲层

该方法的原理是在结构受火面额外设置一层混凝土(牺牲层),以其在火灾中的爆裂剥落为代价,保护内部主体结构不受高温直接作用,维持整体稳定[18]。然而,牺牲层在火灾中剧烈剥落不仅可能砸伤人员和阻碍救援,且其剥落深度难以控制。例如,英吉利海峡隧道火灾案例显示,450 mm 厚的牺牲层火灾后仅剩 40 mm,其保护效果有限[72]。同时,设置牺牲层会减小隧道净空,增加开挖断面和工程成本。

(2)增大截面尺寸与增加配筋

通过增大截面尺寸(包括增加钢筋保护层厚度、施加二衬等)或在受火侧增设钢筋网[73],可以提高结构的耐火极限并减轻爆裂损伤。这种方法简单直接,但同样会导致工程量增加、材料消耗增大,且无法从根本上控制混凝土的爆裂行为,经济性较差。

综合上述 3 类传统抗火措施,尽管其在防护原理上各有侧重,防火板、防火涂层等被动防火措施立足于“阻断热传递路径”,材料改性立足于“提升隧道衬砌本体耐受能力”,构造增强则立足于“增加安全冗余”,但存在共同的缺陷:防火功能的实现往往以牺牲结构可维护性或经济性为代价,未能实现防火、承载与运维三者的协同。因此,亟待发展新型抗火技术。

3.2　新型抗火技术

传统抗火措施普遍存在“防火与承载不协同”的缺陷。为突破这些瓶颈,近年来出现了两种新型抗火技术路径:一是从材料层面赋予隧道结构本体“内置式自防护”能力的微胶囊自抗火混凝土技术;二是从感知与决策层面赋能结构“实时感知-超前预警”能力的智能预警与孪生技术,推动了隧道衬砌抗火技术向自主化、智能化方向发展。

3.2.1　微胶囊自抗火混凝土技术

该技术借鉴微胶囊自修复混凝土概念[74-75],将高温发泡阻燃剂(酸源+炭源+气源)封装成尺度为 10~100 μm 的微胶囊,与混杂纤维共同掺入衬砌内层混凝土中,形成具有自抗火能力的隔热抗爆层[76]。常温下,混杂纤维的增强作用抵消微胶囊引

入导致的性能下降[77]，使内层与外层共同承担荷载，实现防火与承载功能的协同；火灾高温下，一方面，混杂纤维避免混凝土爆裂，聚丙烯熔融后形成网状通道；另一方面，高温触发微胶囊破裂，发泡阻燃剂膨胀发泡（吸热耗能），填充混凝土中的通道及裂缝，并在衬砌表面形成封闭的泡沫隔热屏障。内层受损混凝土与防火泡沫共同构成复合隔热屏障，实现结构自抗火[76]。其作用机理如图 4 所示。这类技术旨在不增加衬砌厚度、不显著降低结构性能的前提下，实现衬砌结构在火灾工况下的自主、自适应防火，代表了隧道结构抗火技术向智能化、一体化方向发展的前沿探索。

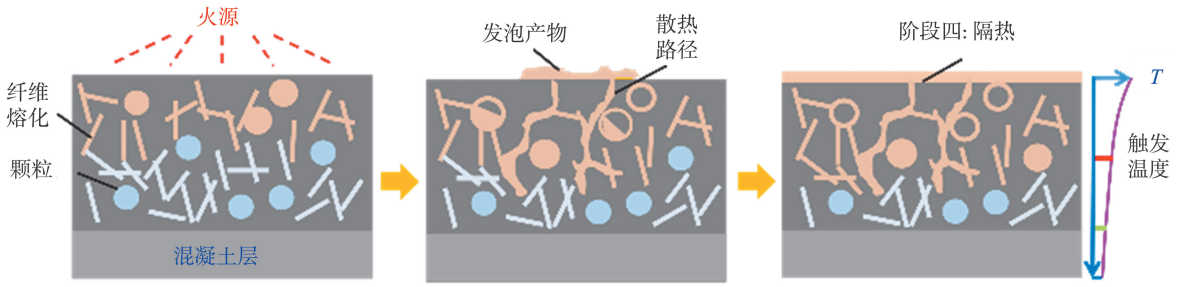


图 4 微胶囊自抗火混凝土作用机理图[76]

Fig.4 Mechanism of microcapsules in fire-resistant concrete[76]

3.2.2 隧道火灾智能预警与孪生技术

与微胶囊技术赋予结构本体“物理自防护”能力不同，智能预警与孪生技术旨在为隧道衬砌结构植入“感知、预测与决策”能力。该技术体系以人工智能（artificial intelligence，AI）与数字孪生为核心，通过融合多源传感数据与物理模型，实现火灾全过程中衬砌结构状态的实时感知、超前预警与可视化呈现。基于机器学习代理模型，通过建立“易测参数（如衬砌表面温度）-关键响应指标（如变形、接头张开量）”的快速映射，实现火灾下结构力学响应的实时预测[78-80]；此外，利用数字孪生技术融合分布式光纤测温等多源数据，可反演重构衬砌内部三维温度场与损伤演化过程，并通过可视化平台实现火灾场景的实时呈现与超前推演。研究表明，AI 模型可超前预测（如超前 60~120 s）火势蔓延趋势、衬砌高温区域演化及关键响应指标的未来变化[81-82]，为人员疏散与消防救援争取宝贵时间。

未来隧道抗火技术正从“外挂式防护”向“内置式自防护”转变，从“被动防护”向“主动响应”演进，从“功能单一”向“智能韧性体系”发展。尽管上述两类新型抗火技术具有前沿性，但目前仍处于研究发展阶段，工程应用仍面临一定局限。微胶囊自抗火混凝土技术在工程应用中面临的主要挑战包括：微胶囊与混凝土基体的长期相容性、微胶囊在混凝土搅拌过程中的完整性、在大尺度衬砌结构中的均匀分散工艺，以及其在碱性环境中的长期耐久性仍需探索。智能预警与孪生技术同样面临若干工程化瓶颈：其一，现有传感技术在 1 000 ℃以上极端火场中的长期存活能力难以保证；其二，分布式传感信号与结构真实力学响应之间的解耦算法尚不成熟；其三，AI 模型的训练依赖大量高质量数据，而真实火灾试验数据获取困难；其四，系统部署与运维成本较高。综上所述，新型抗火技术的工程应用仍需在材料耐久性、传感器可靠性、模型泛化能力等方面开展深入研究。建议在实际工程中采取“传统措施为主、新型技术试点”的渐进式应用策略，在充分验证技术成熟度的基础上逐步推广。

3.3 隧道衬砌结构差异化抗火策略

上述抗火措施的选择并非一成不变，实际工程中还需根据隧道类型、施工工法、功能等级及运营环境等差异，采取“因隧制宜”的差异化策略。不同类型隧道在火灾荷载、衬砌结构、渗水条件和修复难度等方面存在显著差异，这些差异直接影响抗火措施的适用重点与技术经济合理性。本研究从施工工法、功能等级、运营环境 3 个维度，系统梳理了各类隧道的差异化抗火策略，如表 2 所示。需要说明的是，表 2 中各类措施的选择应遵循“因隧制宜、突出重点、协同设计、经济合理”的原则。例如，在实际工程中，盾构隧道应侧重管片混凝土改性与接缝防护；矿山法隧道应侧重二衬混凝土的材料改性与防火涂层应用；水下隧道需强化冗余防护，将抗火设计与防水设计、结构耐久性设计统筹考虑；高寒地区隧道则需兼顾抗冻与抗火需求[83]。工程设计人员应根据具体工程条件，选择适宜的抗火措施组合，在保障安全的前提下兼顾经济性。

表 2　不同类型隧道衬砌差异化抗火策略

Table 2　Fire resistance strategies for different types of tunnel linings

分类维度	隧道类型	主要风险	推荐抗火措施	适用边界与注意事项
施工工法	盾构隧道	管片接头高温失效、接缝渗漏	管片混凝土掺加混杂纤维(如钢纤维+聚丙烯纤维);接缝耐高温密封处理;管片内表面防火涂层	内径受限,不宜采用牺牲层;大直径隧道应加强拱顶防护
	矿山法隧道	初支与二衬界面脱空、二衬爆裂	二衬混凝土掺加纤维;二衬内表面防火涂层/防火板;优化初支-二衬界面粘结	断面形式灵活,施工空间充裕;可灵活组合多种措施
	明挖隧道	结构整体性较好,风险相对较低	常规抗火设计	结构整体性好,抗火需求相对较低
功能等级	一、二类隧道(特长、重要)	交通量大、疏散困难、社会影响广	多重防护:纤维混凝土+防火涂层+水喷淋系统	耐火极限要求严格(RABT 或 HC 标准);应进行专项抗火设计
	三、四类隧道(一般)	交通量小、风险相对较低	单一防护:纤维混凝土或防火涂层	满足规范最低要求
运营环境	水下隧道	高外水压突水、衬砌开裂渗漏、修复困难	多重防护:抗爆裂混凝土+防火涂层+水喷淋+耐高温密封垫	抗火与防水、耐久性统筹设计
	山岭隧道	交通火灾、烟气扩散	结合交通流量差异化配置,采取单一防护或多重防护	高交通量隧道提高等级;低交通量隧道可按规范下限设计
	高寒地区隧道	冻融-火灾耦合损伤	协同设计:引气剂+纤维;保温层与防火层协调设置	抗火与抗冻害协同;进行冻融-火灾耦合试验验证

4　未来展望

尽管现有研究已取得显著进展,但构建覆盖“灾前-灾中-灾后”全生命周期的智能化抗火体系仍面临诸多挑战。例如,多场耦合机理认知与模型验证存在鸿沟;新型抗火材料的全寿命周期性能演化规律研究不足;人工智能模型面临数据瓶颈与物理一致性挑战。面向未来,隧道衬砌结构抗火技术将重点聚焦于以下方向。

(1)发展多场耦合的高保真数值模型与验证体系。未来应致力于构建热-水-力-化学多场耦合模型,建立与足尺火灾试验的交互验证机制。

(2)推进隧道自抗火混凝土的多功能化与全寿命设计。建立微胶囊-纤维-混凝土复合体系在全寿命周期内的性能演化模型,揭示其在环境侵蚀、疲劳荷载与潜在火灾序列作用下的衰减规律。

(3)发展数物融合与人工智能相结合的智能抗火模型。将热传导方程与材料高温本构关系作为先验物理约束嵌入物理信息神经网络,在稀疏传感器条件下实现衬砌温度场、应力场与材料参数场的联合反演,解决小样本条件下的泛化难题与物理一致性问题,增强 AI 决策的透明度与可靠性。

(4)数字孪生系统能够实现与智能通风、疏散指示等系统的闭环联动,完成从“灾后被动评估”向“灾中主动干预”的跨越,全面提升隧道衬砌结构全生命周期的抗火韧性。

5　结论

通过对隧道衬砌结构抗火技术的系统研究,可得出以下主要结论。

(1)隧道衬砌结构在火灾作用下的损伤机理主要表现为蒸汽压、热应力和热开裂 3 种机制的耦合作用。学术界对三者的主次关系仍存争议,较为共识的观点是:蒸汽压与热应力的耦合效应尤为显著,孔隙压力增大了混凝土内部的拉应力水平,而温度梯度则加速了水分迁移和蒸汽生成。理解其相互作用机制是发展隧道抗火技术的基础。

(2)衬砌结构在高温下呈现显著的材料性能退化与复杂力学响应。温度场呈三维非均匀分布,拱顶区域温度最高。建立准确的多场耦合本构模型与高温响应分析方法,是提升隧道抗火设计水平的核心。

(3)传统抗火措施如防火涂层、纤维改性与构造增强等在工程中广泛应用,但无法实现防火与承载功能的协同,存在耐久性不足或经济性差等问题。

(4)未来隧道衬砌结构抗火技术向自防护、智能化、一体化方向发展。微胶囊自抗火混凝土技术通过材料自响应实现结构自主防护;智能预警与孪

生技术则赋予结构“感知–预测–决策”能力,二者共同提升隧道工程全生命周期的抗火韧性。此外,传统抗火措施仍是当前保障安全的主体手段,新型技术宜在试点验证基础上逐步推广,实现以传统措施保障安全、新型技术提升效能的协同发展。

(5)隧道抗火设计应遵循“因隧制宜、突出重点、协同设计、经济合理”的原则。工程设计人员应根据施工工法、功能等级、运营环境和火灾风险等条件,选择适宜的抗火措施组合,在保障安全的前提下兼顾经济性。

参考文献:

[1] Ingason H, Li Y Z, Lönnermark A. Runehamar tunnel fire tests[J]. Fire Safety Journal, 2015, 71: 134-149.

[2] 刘腾, 袁大军, 王安华, 等. 火灾对原型盾构管片接头防水性能损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7):116-122.
Liu Teng, Yuan Dajun, Wang Anhua, et al. Experimental study on watertight performance of prototype shield tunnel segment joint affected by fire[J]China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 116-122.

[3] 杨文倩, 封坤, 张朝月, 等. 基于混凝土高温塑性本构的盾构隧道火灾数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(增刊1): 834-844.
Yang Wenqian, Feng Kun, Zhang Zhaoyue, et al. Numerical simulation of shield tunnel fire based on high temperature plastic constitutive model of concrete[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(S1): 834-844.

[4] Yan Z G, Zhu H H, Ju J W. Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 610-618.

[5] 廖仕超. 隧道火灾下衬砌结构承载力研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011:1-2.

[6] Kirkland C J. The fire in the channel tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 17(2): 129-132.

[7] 张高乐, 张稳军, 喻国伦, 等. 火灾高温下盾构隧道衬砌结构热力耦合模型试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(7):120-128.
Zhang Gaole, Zhang Wenjun, Yu Guolun, et al. Model test on thermomechanical coupling of shield tunnel lining under high fire temperature[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(7): 120-128.

[8] Yan Z G, Shen Y, Zhu H H, et al. Experimental study of tunnel segmental joints subjected to elevated temperature [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 53: 46-60.

[9] 蔡艾宏, 熊藤根, 王峰. 隧道火灾高温特性与衬砌混凝土爆裂及抗爆措施研究现状分析[J]. 交通节能与环保, 2025, 21(4):41-46.
Cai Aihong, Xiong Tenggen, Wang Feng. Review of characteristics of tunnel fire at high temperatures and spalling of lining concrete and explosion prevention measures [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2025, 21(4): 41-46.

[10] Kodur V K R, Sultan M A. Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(2): 101-107.

[11] Ju Y, Liu J H, Liu H B, et al. On the thermal spalling mechanism of reactive powder concrete exposed to high temperature: numerical and experimental studies[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 98: 493-507.

[12] 何倍, 张红恩, 朱新平, 等. 高温环境下超高性能混凝土力学性能及劣化机制研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(11): 3470-3481.
He Bei, Zhang Hongen, Zhu Xinping, et al. Review on mechanical properties and degradation mechanism of ultra-high performance concrete in elevated environment [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(11): 3470-3481.

[13] Kodur V, Banerji S. Modeling the fire-induced spalling in concrete structures incorporating hydro-thermo-mechanical stresses[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 117: 103902.

[14] Zeiml M, Leithner D, Lackner R, et al. How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete? [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(5): 929-942.

[15] Kalifa P, Menneteau F D, Quenard D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(12): 1915-1927.

[16] 公伟, 胡克旭. 自密实混凝土结构抗火研究进展[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 1-9.
Gong Wei, Hu Kexu. Progress of research on fire resistance of self-compacting concrete structures[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3): 1-9.

[17] 张桥. 高性能混凝土高温损伤试验及温度场模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016: 34-44.
Zhang Qiao. The research on high temperature damage and temperature field simulation of high performance concrete[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technolo-

gy, 2016: 34-44.

[18] 朱平华, 于树奇, 刘文影, 等. 高性能混凝土抗隧道火灾爆裂剥落研究现状综述[J]. 混凝土, 2018(7): 24-29.
Zhu Pinghua, Yu Shuqi, Liu Wenying, et al. Review of the research status of high performance concrete anti-tunnel fire spalling[J]. Concrete, 2018(7): 24-29.

[19] Fu Y F, Wong Y L, Poon C S, et al. Numerical tests of thermal cracking induced by temperature gradient in cement-based composites under thermal loads[J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29(2): 103-116.

[20] Khaliq W, Kodur V. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(11): 1112-1122.

[21] Kodur V, Banerji S, Solhmirzaei R. Effect of temperature on thermal properties of ultrahigh-performance concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(8): 04020210.

[22] Li Q H, Sun C J, Xu S L. Thermal and mechanical properties of ultrahigh toughness cementitious composite with hybrid PVA and steel fibers at elevated temperatures [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 176: 107201.

[23] Chan S Y N, Peng G F, Chan J K W. Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature[J]. Materials and Structures, 1996, 29(10): 616-619.

[24] Fu Y F, Wong Y L, Poon C S, et al. Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(5): 789-797.

[25] Yoon M, Kim G, Kim Y, et al. Creep behavior of high-strength concrete subjected to elevated temperatures[J]. Materials, 2017, 10(7): 781.

[26] Khoury G A. Strain of heated concrete during two thermal cycles. part 2: strain during first cooling and subsequent thermal cycle[J]. Magazine of Concrete Research, 2006, 58(6): 387-400.

[27] 陈信作. 高温后纤维高性能混凝土力学特性及细观数值模拟研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2024: 24-31.

[28] 高志飞. 隧道衬砌管片抗火性能试验研究与模型分析[D]. 北京: 北京科技大学, 2024: 49-60.
Gao Zhifei. Experimental study and model analysis of fire resistance of tunnel lining segments[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2024: 49-60.

[29] Petkovski M. Effects of stress during heating on strength and stiffness of concrete at elevated temperature[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(12): 1744-1755.

[30] 闫治国, 王紫锐, 沈奕, 等. 碳氢曲线下大直径盾构隧道结构热力特性[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(2):25-36.
Yan Zhiguo, Wang Zirui, Shen Yi, et al. Thermal characteristics of a lining of a large diameter shield tunnel under hydrocarbon curve[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(2): 25-36.

[31] 杜长宝. 地下综合管廊电缆火灾温度场分布及烟气流动特性分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 9-18.
Du Changbao. Analysis of temperature field distribution and smoke flow characteristics of cable fire in underground pipe gallery[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 9-18.

[32] Wang F, Wang M N, Huo J X. The effects of the passive fire protection layer on the behavior of concrete tunnel linings: a field fire testing study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 69: 162-170.

[33] 朱合华, 闫治国, 梁利, 等. 不同火灾升温曲线下隧道内温度场分布规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(增刊 1): 1595-1600.
Zhu Hehua, Yan Zhiguo, Liang Li, et al. Numerical study on temperature distribution in tunnel linings under fire cases[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(S1): 1595-1600.

[34] 韩巍巍. 火灾作用下长大公路隧道热力耦合效应及损伤演化规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2024: 16-25.
Han Weiwei. Study on thermal-mechanical coupling effect and damage evolution law of long highway tunnel under fire[D]. Xi′an: Chang′an University, 2024: 16-25.

[35] JTG D70/2—2014 公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设施[S].

[36] 沈奕, 闫治国, 沈安迪. 火灾后 RC 及 HFRC 隧道管片破坏试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(2): 531-537.
Shen Yi, Yan Zhiguo, Shen Andi. Experimental study on the post-fire failure mode of RC and HFRC tunnel segments[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 531-537.

[37] Shen Y, Zhu H H, Yan Z G, et al. Semi-analytical thermo-mechanical model for the shield tunnel segmental joint subjected to elevated temperatures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 118: 104170.

[38] 肖明清, 杨文倩, 封坤, 等. 火灾下盾构隧道衬砌结构受力与抗火措施模拟分析[J].现代隧道技术, 2023, 60(3):199-207.
Xiao Mingqing, Yang Wenqian, Feng Kun, et al. Simulation analysis of the forces on lining structure of shield tunnels and fire resistance measures during fire [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(3): 199-207.

[39] 潘东. 火灾作用下大直径盾构隧道衬砌力学性能和损伤规律研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 42-48.
Pan Dong. Study on mechanical properties and damage laws of large diameter shield tunnel lining under fire scenario[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 42-48.

[40] 王峰, 曾锦屏, 方亚彪, 等. 基于瞬态热应变的隧道火灾高温衬砌结构变形机理研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(3): 856-863.
Wang Feng, Zeng Jinping, Fang Yabiao, et al. Research on the mechanism of deformation of tunnel lining structure exposed to fire based on transient thermal strain[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, 55(3): 856-863.

[41] Wang F, Xiong T G. A finite difference model for coupling thermo-hydro-vapor in the lining concrete exposed to high temperatures and its application[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 211: 109696.

[42] Yan Z G, Zhang Y, Shen Y, et al. A multilayer thermo-elastic damage model for the bending deflection of the tunnel lining segment exposed to high temperatures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95: 103142.

[43] Pichler C, Lackner R, Mang H A. Safety assessment of concrete tunnel linings under fire load[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(6): 961-969.

[44] Zhang Y M, Zeiml M, Pichler C, et al. Model-based risk assessment of concrete spalling in tunnel linings under fire loading[J]. Engineering Structures, 2014, 77: 207-215.

[45] Zhou Z H, Shen Y, Yang W G, et al. Coupled CFD-FEM methodology for structural fire safety of composite lining shield tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 150: 105834.

[46] Zhou Z H, Yang W G, Yan Z G, et al. Impact of fire on the transverse and longitudinal structural mechanical behavior of deep-buried large-diameter dual-layer lining tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2026, 167: 106987.

[47] Gan Y, Ou X D, Jiang J, et al. Thermo-hydro-mechanical responses of geological conditions surrounding tunnel subjected to fire and implication for tunnel structure[J]. Computers & Structures, 2025, 315: 107789.

[48] Kim H J, Kim H Y, Lee J S, et al. An experimental study on thermal damage and spalling of concrete under loading conditions in a tunnel fire[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2011, 10(2): 375-382.

[49] Chang S H, Choi S W, Bae G J. Assessment of fire-induced damage on concrete segment of shield TBM tunnel [J]. Key Engineering Materials, 2006, 321: 322-327.

[50] Chen H B, Liu T, You X H, et al. Experimental investigation on fire damage to staggered segmental lining of shield tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 141: 105359.

[51] Jin D L, Jin H, Yuan D J, et al. Physical and mechanical response of large-diameter shield tunnel lining structure under non-uniform fire: a full-scale fire test-based study[J]. Underground Space, 2025, 20: 1-16.

[52] Choi S W, Lee J, Chang S H. A holistic numerical approach to simulating the thermal and mechanical behaviour of a tunnel lining subject to fire [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 35: 122-134.

[53] Qiao R J, Shao Z S, Liu F Y, et al. Damage evolution and safety assessment of tunnel lining subjected to long-duration fire [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 354-363.

[54] 周亮, 王伟, 甘经华, 等. 透明磷系防火涂料的阻燃协同作用机制研究进展[J]. 新型建筑材料, 2026, 53(3): 105-113.
Zhou Liang, Wang Wei, Gan Jinghua, et al. Advances in flame-retardant mechanisms and synergistic strategies of transparent phosphorus-based coatings [J]. New Building Materials, 2026, 53(3): 105-113.

[55] 黄震, 叶张骞, 张嘉伟, 等. 膨胀型防火涂料对装配式框架隧道耐火性影响[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(2):46-58.
Huang Zhen, Ye Zhangqian, Zhang Jiawei, et al. The influence of intumescent fire-retardant coating on the fire resistance of assembled frame tunnel[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(2): 46-58.

[56] 李建涛, 刘向荣, 苏智魁. 硅气凝胶隧道防火涂料的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(10): 14-17.
Li Jiantao, Liu Xiangrong, Su Zhikui. Preparation and properties of silica aerogel fire-retardant coatings for tunnel[J]. New Building Materials, 2014, 41(10): 14-17.

[57] Kim S, Seo J, Cha J, et al. Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 501-505.

[58] Gao T, Jelle B P, Gustavsen A, et al. Aerogel-incorporated concrete: an experimental study[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 130-136.

[59] 贾卓. 不同隧道截面尺寸下火灾烟气蔓延行为及烟气层稳定性分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2025: 71-77.
Jia Zhuo. Analysis of fire smoke spread behavior under different tunnel dimensions and stability of smoke layer [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2025: 71-77.

[60] Khoury G. Passive fire protection in tunnels[J]. Concrete, 2003, 37(2): 31-36.

[61] Kalifa P, Chéné G, Gallé C. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(10): 1487-1499.

[62] 尹强. 聚丙烯纤维对高强混凝土高温后力学性能的影响[J]. 太原理工大学学报, 2013, 44(5): 651-654.
Yin Qiang. The effect of PPR fiber on the mechanical behavior of HSC after exposed to high temperature[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013, 44(5): 651-654.

[63] 鞠丽艳, 张雄. 混杂纤维对高性能混凝土高温性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 89-92.
Ju Liyan, Zhang Xiong. Effects of hybrid fiber on high performance concrete properties under high temperature [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(1): 89-92.

[64] Bangi M R, Horiguchi T. Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(2): 459-466.

[65] Li Y, Pimienta P, Pinoteau N, et al. Effect of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on explosive spalling and pore pressure in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 99: 62-71.

[66] Zhang H E, Kumar Sarker P, Wang Q Y, et al. Comparison of compressive, flexural, and temperature-induced ductility behaviours of steel-PVA hybrid fibre reinforced OPC and geopolymer concretes after high temperatures exposure[J]. Construction and Building Materials, 2023, 399: 132560.

[67] 张劲竹, 刘华新, 王家贺, 等. 混杂纤维混凝土高温后性能劣化分析与强度预测[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(4): 1260-1269.
Zhang Jinzhu, Liu Huaxin, Wang Jiahe, et al. Performance degradation analysis and strength prediction of hybrid fiber reinforced concrete after high temperature[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(4): 1260-1269.

[68] Ozawa M, Morimoto H. Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-perfor-mance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 83-92.

[69] Zhang D, Tan K H, Dasari A, et al. Effect of natural fibers on thermal spalling resistance of ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 109: 103512.

[70] Khoury G A. Effect of fire on concrete and concrete structures[J]. Rogress in Structural Engineering and Materials, 2000, 2(4): 429-447.

[71] 李娜. 相变储能材料在混凝土结构抗火中的应用基础研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
Li Na. Applied fundamental research of phase change stored energy material in the fire resistance of concrete structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[72] 章伟, 蒋首超. 隧道结构防火研究综述[J]. 四川建筑科学研究, 2011, 37(2):115-119.
Zhang Wei, Jiang Shouchao. A general view on fire safety of tunnel structure[J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(2): 115-119.

[73] 时旭东, 过镇海. 适用于结构高温分析的砼和钢筋应力-应变关系[J]. 工程力学, 1997(2): 30-37.
Shi Xudong, Guo Zhenhai. Stress strain relationships of concrete and reinforcement used for analysis of beam column structures at elevated temperature[J]. Engineering Mechanics, 1997(2): 30-37.

[74] White S R, Sottos N R, Geubelle P H, et al. Autonomic healing of polymer composites[J]. Nature, 2001, 409(6822): 794-797.

[75] Yang Z X, Hollar J, He X D, et al. A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(4): 506-512.

[76] 张通. 自抗火超高性能混凝土作用机理及热力特性多尺度研究[D]. 上海: 同济大学, 2022: 21-47.
Zhang Tong. Multiscale study on mechanism and thermo-mechanical properties of fire-resistant ultra-high performance concrete[D]. Shanghai: Tongji University, 2022: 21-47.

[77] Chiaia B, Fantilli A P, Vallini P. Combining fiber-rein-

forced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings[J]. Engineering Structures, 2009, 31(7): 1600-1606.

[78] Nan Z J, Orabi M A, Huang X Y, et al. Structural-fire responses forecasting via modular AI[J]. Fire Safety Journal, 2023, 140:103863.

[79] Ji W, Li G Q, Zhu S J. Real-time prediction of key monitoring physical parameters for early warning of fire-induced building collapse[J]. Computers & Structures, 2022, 272: 106875.

[80] 郭志国, 李益锌, 周令剑, 等.公路隧道火灾应急技术研究现状与展望[J].隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(2): 13-24.
Guo Zhiguo, Li Yixin, Zhou Lingjian, et al. Current situation and prospect of fire emergency technology research in highway tunnel[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(2): 13-24.

[81] Xie W K, Zeng Y F, Zhang X N, et al. AIoT-powered building digital twin for smart firefighting and super real-time fire forecast[J]. Advanced Engineering Informatics, 2025, 65: 103117.

[82] Zhang X N, Jiang Y S, Wu X Q, et al. AIoT-enabled digital twin system for smart tunnel fire safety management[J]. Developments in the Built Environment, 2024, 18: 100381.

[83] 马超, 乔法宇, 王国盛, 等. FRCM 加固盾构隧道管片接头提升结构整体力学行为[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2026, 8(1): 22-31.
Ma Chao, Qiao Fayu, Wang Guosheng, et al. Improvement of the overall mechanical behavior of shield tunnel by FRCM strengthening the segment joints[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(1): 22-31.

(编辑:宋艳)

·通知消息·

《隧道与地下工程灾害防治》征稿细则

《隧道与地下工程灾害防治》是由国家教育部主管,山东大学主办,国内外公开发行的专业性学术期刊,国内统一连续出版物号 37-1516/U,国际标准连续出版物号 2096-5052,国内入选 RCCSE 中国核心学术期刊、CACJ 中国应用型核心期刊和《公路运输领域高质量科技期刊分级目录》T2 级;国外入选 Scopus、EBSCO、DOAJ、GeoRef 等数据库。

一、宗旨及内容

本刊旨在立足中国、面向世界、服务学者、服务社会、引领国际学术前沿,为从事隧道与地下工程研究的专业工作者、高校教师及研究生提供一个多学科交叉融合、开放的学术交流平台。

本刊重点报道国内外隧道与地下工程建设进展、灾害预报与防治、安全控制、信息化、智能化、多学科交叉等方面的重要研究成果,及其他行业领域的新技术、新方法、新装备、新工艺等在隧道与地下工程领域的应用,大力宣传国内外隧道与地下工程灾害防治技术的学术理论、创新思想。

二、投稿、审稿和稿件录用

1.所有稿件均未在国内外公开发表,请勿一稿多投。

2.投稿可通过网络系统投稿,网址:http://tunnel.sdujournals.com/Journalx_sdydxgczhfz/authorLogOn.action。作者可扫描我刊二维码关注“隧道与地下工程灾害防治”,微信号 sydzhfz,随时了解稿件进展情况。

3.本刊所有稿件采用同行专家评议(双盲审稿)。本刊一般自收到稿件起 3 个月内返回审稿意见,外审专家因故未能及时发回审校意见者,时间可能适当延长,在此期限后作者如未收到本刊联系修改的函件等,在书面通知编辑部并收到编辑部确认回复之后,可对稿件另作处理。稿件定稿后作者不得随意要求撤稿和更改。凡向本刊投稿的作者,均视为同意此约定。

4.专家审稿请登陆:http://tunnel.sdujournals.com“专家审稿”。

5.所有经审稿专家评审通过并录用的稿件,免收审稿费。

6.文稿刊出后寄送 3 份当期纸刊以致酬谢。