

项目名称	隧道衬砌结构热-力耦合损伤跨尺度机理与调控理论		
申报奖种	自然科学奖	申报等级	☐ 仅一等 ☒ 二等及以上 ☐ 三等及以上
项目简介	中国运营隧道总里程已突破 5 万公里；随着川藏铁路、深中通道等国家重大工程向高海拔、深埋、长大化方向推进，隧道衬砌结构面临的火灾风险急剧攀升。在极端热-力耦合环境下，衬砌结构的损伤演化涉及材料多尺度结构响应与多物理场耦合作用，是隧道工程防灾减灾领域的重要基础科学问题。当前在火灾作用下，衬砌结构仍面临微观机理不清、跨尺度传递规律缺失以及性能调控理论不足等关键瓶颈，制约了抗火设计的理论发展与工程应用。 本项目围绕“衬砌结构热力耦合损伤机理与多尺度调控理论”，按照“高温损伤机理—跨尺度表征模型—协同调控理论构建”的技术路线开展系统研究，并取得如下创新性认识： 1）从原子与纳米尺度揭示了水化产物（C-S-H）在高温条件下的异常力学响应与热输运机制，发现其颗粒本构强度在特定温域内呈增强趋势，突破了“高温必然削弱材料本构性能”的传统认知，并阐明了声子振动主导热导率演化的微观物理机制。中国工程院院士刘加平高度认同混凝土高温损伤机理的发现，并将其作为 C-S-H 高温转变机制的关键科学依据。 2）揭示了火灾作用下纤维混凝土从微观损伤萌生到宏观断裂失稳的热-力耦合跨尺度演化规律，建立了纤维-基体界面作用与结构断裂能耗散之间的内在映射关系，阐明了热-力-损伤多场在非均质结构中的协同演化机制。欧洲科学院院士德国波鸿鲁尔大学 Günther Meschke 教授积极肯定了多尺度理论模型，并将该模型作为其模型建立的理论依据。 3）提出多尺度组分体系对混凝土热-力性能的协同调控机制，构建了“损伤逐级耗散—相变调控热压效应—纤维骨架维持结构稳态”的材料-结构一体化抗火韧性理论框架，为衬砌结构抗火性能优化提供了可设计的理论基础与调控路径。美国土木工程师学会会士、美国密歇根州立大学杰出 Venkatesh Kodur 教授认可了多尺度组分体系对混凝土热力学性能的影响规律，并利用其实现了 UHPC 结构抗火性能的分析。 本项目在 3 项国家自然科学基金资助下，发表与本项目相关的 SCI 论文共计 100 余篇，总引用次数达 4000 余次；本项目 5 篇国际期刊代表性论文发表在 Cement and Concrete Composites (IF: 14.4)、Tunnelling and Underground Space		

	Technology (IF: 8.7)、Composite Structures (IF: 7.8)、Journal of Cleaner Production (IF: 10.7, 自然指数期刊)等专业权威期刊上。5 篇国际期刊代表性论著已被 Web of science 引用 362 次, 其中单篇 SCI 高达 106 次, 2 篇 ESI 高被引, 1 篇国内核心期刊引用 107 次。项目第一完成人 39 岁, 平均年龄约为 40 岁, 主要完成人入选国家杰青 (1 人次), 国家优青 (1 人次), 石家庄市骨干人才 (青年) (1 人次) 等多项人才计划, 有力推动了防火减灾科学的发展。
主要完成单位及创新推广贡献	申报自然科学奖可不填
推广应用及经济社会效益情况	申报自然科学奖可不填
代表性论文专著目录	
1. Zhang Yao, Zhang Shaoqi, Jiang Xi, Chen Qing, Jiang Zhengwu, Ju J.Woody., Bauchy Mathieu, Insights into the thermal effect on the fracture toughness of calcium silicate hydrate grains: A reactive molecular dynamics study [J], Cement and Concrete Composites. 134 (2022): 104824. (引用 63 次, 中科院 1 区, TOP) 2. Zhang Tong, Zhang Yao, Zhu Hehua, Yan Zhiguo. Experimental investigation and multi-level modeling of the effective thermal conductivity of hybrid micro-fiber reinforced cementitious composites at elevated temperatures [J]. Composite Structures, 2021, 256: 112988. (引用 50 次, 中科院 2 区, TOP) 3. Zhang Yao, Ju J. Woody, Zhu Hehua, Yan Zhiguo. A novel multi-scale model for predicting the thermal damage of hybrid fiber-reinforced concrete [J]. International Journal of Damage Mechanics 2020; 29(1):19 – 44. (引用 105 次, 中科院 2 区) 4. Zhang Yao, Zhang Shao, Jiang X, Xi Jiang, Weigang Zhao, Yichao Wang, Peihua Zhu, Zhiguo Yan, Hehua Zhu. Uniaxial tensile properties of multi-scale fiber reinforced rubberized concrete after exposure to elevated temperatures [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 389: 136068. (引用 106 次, 中科院 1 区, TOP) 5. Yan Zhi-guo, Zhang Yao, Shen Yi, Zhu Hehua, Yong Lu, 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, 95(2020),103142. (引用 38 次, 中科院 1 区, TOP) 6. 陈庆, 马瑞, 蒋正武, 王慧. 基于 GA-BP 神经网络的 UHPC 抗压强度预测与配合比设计[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):1 76-183+191. (知网引用 107 次)	
主要知识产权证明目录	
1. 张耀, 张绍绮, 赵维刚, 徐飞, 李琦. 主动抗火的隧道系统: ZL202211358246.7[P]. 2023-02-03.	

2. 张耀, 张绍绮, 王义超, 杨雨濛, 赵维刚. 绿色高强耐高温多尺度纤维增强橡胶混凝土及其制备方法: ZL202310508212.X[P]. 2023-06-06.
3. 张耀, 张绍绮, 雷茜茹, 王义超, 杨雨濛, 马迷娜, 朱沛华, 赵维刚. 高延性多尺度纤维增强水泥基复合材料及其制备方法: ZL202311140364.5[P]. 2023-10-13.
4. 闫治国, 张耀, 朱合华, 丁文其. 自防火水泥基复合材料: ZL201611020202.8 [P]. [2019-01-25].
5. 张耀, 熊阮翔, 王义超, 杨雨濛, 马迷娜, 朱沛华, 赵维刚. 纤维增强再生砂耐高温地聚物及其制备方法: ZL202311607748.3[P]. [2024-01-30].

主要完成人情况表（排名、姓名、技术职称、工作单位、对本项目技术创造性贡献、曾获奖励情况）						
排名	姓名	技术职称	工作单位	完成单位	贡献	曾获奖励情况
1	张耀	副教授	石家庄铁道大学	石家庄铁道大学	项目负责人，对衬砌材料高温损伤机理（科学发现点 1）、衬砌结构热力耦合特性多尺度表征方法（科学发现点 2）和衬砌结构抗火性能多尺度调控方法（科学发现点 3）研究、推广应用做出了重要贡献。	2024 年，长大隧道火灾防控与安全低碳运维关键技术，上海市技术发明一等奖，12/15
2	闫治国	教授	同济大学	同济大学	项目主要完成人，对衬砌结构热力耦合特性多尺度表征理论（科学发现点 2）和衬砌结构抗火性能多尺度调控理论（科学发现点 3）研究、推广应用做出了重要贡献。	2024 年，长大隧道火灾防控与安全低碳运维关键技术，上海市技术发明一等奖，1/15 2008 年，软土盾构隧道设计理论与施工控制技术及其应用，国家科技进步二等奖，10/10； 2016 年，城市高密集区大规模地下空间建造关键技术及其集成示范，国家科技进步二等奖，4/10
3	张通	副教授	东北大学	同济大学	项目主要完成人，对衬砌结构多尺度组分体系对混凝土热-力性能的协同调控理论做出了重要贡献（科学发现点 3）。	2024 年，长大隧道火灾防控与安全低碳运维关键技术，上海市技术发明一等奖，13/15
4	沈奕	副研究员	同济大学	同济大学	项目主要完成人，对衬砌结构抗火性能多尺度调控方法（科学发现点 3）研究、推广应用做出了重要贡献。	2025 年，隧道结构火致灾变数物融合智算与自主增

						强技术，中国公路学会发明一等奖， 5/8
5	陈庆	教授	同济大学	同济大学	项目主要完成人，对衬砌结构混凝土材料热力耦合损伤机理（科学发现点 1）与性能调控理论（科学发现点 3）研究做出了重要贡献。	2025 年，水环境地下结构混凝土自防护调控机制，上海市自然科学一等奖， 1/5

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	备注
1	共同署名发表论文	张耀/1 闫治国/2 沈奕/4	2020	代表性论文 5: Yan Zhi-guo, Zhang Yao, Shen Yi,Zhu He-hua, Yong Lu, 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, 95 (2020), 103142.	
2	共同署名发表论文	张耀/1 陈庆/5	2022	代表性论文 1: Zhang Yao, Zhang Shaoqi, Jiang Xi, Chen Qing, Jiang Zhengwu, Ju J.Woody., Bauchy Mathieu, Insights into the thermal effect on the fracture toughness of calcium silicate hydrate grains: A reactive molecular dynamics study[J], Cement and Concrete Composites. 134 (2022): 104824.	
3	共同署名发表论文	张通/3 张耀/1 闫治国/2	2021	代表性论文 2: Zhang Tong, Zhang Yao, Zhu Hehua, Yan Zhiguo. Experimental investigation and multi-level modeling of the effective thermal conductivity of hybrid micro-fiber reinforced cementitious composites at elevated temperatures[J]. Composite Structures, 2021, 256: 112988.	