提名项目公示

一、成果名称：钢混组合结构梁桥抗腐蚀关键技术分析理论和工程应用

二、提名者：陕西省委军民融合发展委员会办公室

三、提名等级：陕西省科学技术奖三等奖

1. 项目简介：

为打破制约多因素作用下钢混组合桥梁腐蚀的关键技术问题，提升该类桥梁结构全寿命周期使用安全性及耐久性，项目组在省部级科研配套项目的支持下，坚持实际问题导向-计算理论完善-防腐产品开发的主线思路，通过大量模型试验、理论研究和数值模拟，从基础理论到设计技术和产品研发到工程应用，进行了系统深入的研究，从结构理论、设计方法到产品开发，提出了一整套关于多因素作用下钢-混凝土组合梁腐蚀关键技术，主要创新性研究成果有：1、**建立多因素腐蚀作用下钢混凝土组合结构梁桥的桥梁钢力学退化分析模型和计算方法，丰富和发展了钢混组合结构梁桥的腐蚀计算理论。**采用试验研究、有限元模拟与理论分析相结合的方法，腐蚀桥梁钢材Q345，Q370，Q420和耐候钢Q345，采用单调拉伸试验，揭示了腐蚀作用下钢材腐蚀程度与力学性能指标之间的关系并获得其本构关系；建立了强腐蚀动力学曲线；通过腐蚀钢板的金相试验，研究钢板内部微观组织形态的变化，分析了最大蚀坑系数与力学性能的关系；考虑到点蚀损伤对强腐蚀钢材延性的影响，建立了基于腐蚀时间的强腐钢材等效延性断裂准则。基于逆向重建技术将逆向获得的实体模型导入Abaqus与FE-safe平台，模拟分析腐蚀后试件的疲劳寿命。在研究力学性能退化模型的基础上，对荷载与腐蚀性液体耦合作用下钢板组合结构建立有限元模型，分析不同腐蚀率与腐蚀时间下的正弯矩抗弯承载力衰减规律及失效机理，丰富和发展了钢混组合结构梁桥的计算理论。2、**建立多因素腐蚀作用下钢混凝土组合结构梁桥的剪力键的失效机理，提高钢混组合结构梁桥全寿命周期使用安全性及耐久性。**围绕腐蚀作用下钢混组合结构梁桥剪力连接件的力学性能研究，以掌握腐蚀作用下钢板梁剪力连接件力学退化性能演化规律为目的，在力学性能和抗剪性能等方面开展系统深入的研究。建立栓钉和贯穿钢筋连接件腐蚀率与腐蚀时间之间的定量关系模型，并建立强腐作用下栓钉连接件的本构关系模型。通过栓钉和PBL连接件抗剪性能试验研究，研究了腐蚀作用下试件的抗剪性能退化规律。并拟合出抗剪承载力腐蚀系数因子，提出腐蚀作用下栓钉和PBL连接件抗剪承载力的计算公式；根据推出试验结果建立了栓钉和PBL连接件荷载-滑移曲线公式，并拟合出荷载-滑移曲线腐蚀系数因子，提出腐蚀作用下栓钉连接件荷载-滑移曲线计算公式。深层次分析了腐蚀作用下钢混凝土组合结构梁桥的剪力键的失效机理，提高钢混组合结构梁桥全寿命周期使用安全性及耐久性。3、**开发了高效的绿色环保型高耐久钢混组合梁桥防护材料，符合绿色可持续发展理念。**采用纳米创新技术进行配方研发，形成的绿色环保型高耐久钢筋混凝土组合结构纳米防护材料。能有效阻止外界侵蚀介质进入混凝土内部，对混凝土结构起到长效防护作用，具有耐水、耐酸、耐碱、抗氯离子性能优异、粘结附着力强、抗老化性能好、耐污易冲洗等技术特点，水性环保，符合绿色可持续发展理念。同时，通过对桥梁钢新型防腐蚀材料的研制，将有效避免因腐蚀对桥梁钢引起的力学退化性能，此研究成果将大大提高钢板梁耐久性，降低后期养护成本。该新型材料推广应用也可产生可观的经济效益。

项目已获得授权国家发明专利3项，在国内外期刊上发表高水平核心学术论文6篇，其中 SCI/EI 期刊收录5篇，CSCD期刊收录1篇，申请陕西省基金1项。研发了多种绿色环保型高耐久钢混组合结构梁桥防护材料，研究成果丰富和发展了钢混组合结构梁桥的腐蚀计算理论，提高钢混组合结构梁桥全寿命周期使用安全性及耐久性，全寿命周期碳排放优势明显，符合绿色可持续发展理念。研究成果已在国内多座桥梁建设中得到成功应用，社会经济效益显著，推广应用前景广阔。经验收专家组鉴定项目成果总体达到国内先进水平。

五、主要知识产权和标准规范等目录：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 名称 | 国家(地区) | 授权号(标准编号) | 授权(标准发布) 日期 | 证书编号(标准批准发布部门) | 权利人(标准起草单位) | 发明人(标准起草人) | 发明专利(标准)有效状态 |
| 1 | 一种芳纶纤维改性的聚合物水泥防水涂料及其制备方法 | 中国 | CN 113861765 B | 2021年10月27日 | ZL202111253090.1 | 陕西交控新材料有限公司陕西省交通规划设计研究院有限公司 | 马瑞杰；毕伟涛；杨欣；白嘉龙，山颖获 | 授权 |
| 2 | 纤维增强聚合物复合材料及其制备方法 | 中国 | CN 110922616 B | 2021年12月12日 | ZL201911275172.9 | 西安工业大学 | 郭丹；吴佳妮 | 授权 |
| 3 | 一种纳米颗粒夹心复合材料及其制备方法 | 中国 | CN 111029169 B | 2021年12月17日 | ZL201911413649.5 | 西安工业大学 | 郭丹；吴佳妮 | 授权 |
| 4 | 强腐作用下中小跨径钢板组合梁桥力学性能及失效机理的研究  | 中国 | 2021JM-434 | 2021年01月01日 | 陕西省科技厅 | 西安工业大学 | 乔文靖 ，杨帆 ，彭晶蓉 ，朱浩云，张浩 | 结题 |

六、主要论文目录：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 题目 | 期刊 | 收录情况 | 作者及单位（全部） |
| 1 | The load-slip characteristics of stud shear connector after hydrochloric acid corrosion | Structures | SCI收录：WOS:000803040200002 | 杨帆，朱浩云，乔文靖，杜斌 / 西安工业大学 |
| 2 | 强腐后Q345钢力学性能退化试验 | 交通运输工程学报 | EI收录：2023041342231 | 乔文靖，胡启涵，杨帆，张浩，焦雪峰/ 西安工业大学，北亚利桑那大学 |
| 3 | Tensile-Mechanical Degradation-Properties and J-C Constitutive Model of Studs after Strong-Acid Corrosion | KSCE journal of civil engineering | SCI收录：WOS:000830359100001 | 乔文靖，张浩，张岗，杨帆，刘志国/ 西安工业大学，长安大学，中铁宝桥集团有限公司 |
| 4 | Ductility degradation of weathering steel Q345 after exposure to hydrochloricacid corrosion dependent on pitting damage | Journal of Materials in Civil Engineering | SCI收录：WOS:000853934500042 | 乔文靖，张浩，杨帆，刘志国/ 西安工业大学，中铁宝桥集团有限公司 |
| 5 | 强腐作用下钢板组合梁的力学性能及失效机理 | 长安大学学报 (自然科学版) | CSCD核心 | 乔文靖，朱浩云，张岗，杨帆，张浩/ 西安工业大学，长安大学 |
| 6 | Mechanical degradation of Q345 weathering steel and Q345 carbon steel under acid corrosion | Advances in Materials Science and Engineering | SCI收录：WOS:000803966000006 | 杨帆，原淼淼，乔文靖，李娜娜，杜斌 / 西安工业大学，内蒙古科技大学，上海城建职业学院 |

七、主要完成人情况

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 排名 | 职务/职称 | 工作单位 | 对本项目贡献 |
| 乔文靖 | 1 | 副教授 | 西安工业大学 | 1、建立多因素腐蚀作用下钢-混凝土组合梁桥的桥梁钢力学退化分析模型和计算方法，丰富和发展了钢-混组合梁桥的腐蚀计算理论；2、建立多因素腐蚀作用下钢-混凝土组合梁桥的剪力键的失效机理，提高钢-混组合梁桥全寿命周期使用安全性及耐久性。 |
| 杨帆 | 2 | 副教授 | 西安工业大学 | 1. 对腐蚀钢板进行3D形貌扫描，得到微观形貌和力学退化性能的关系；对腐蚀钢板进行有限元分析，探究计算理论；

2、研究了强腐作用下不同腐蚀时间段试件的抗剪性能退化规律，腐蚀作用下栓钉和PBL连接件抗剪性能受力机理及影响参数化的有限元数值分析；3、腐蚀作用下栓钉和PBL连接件抗剪承载力和荷载-滑移曲线公式分析。 |
| 马瑞杰 | 3 | 高级工程师 | 陕西交控新材料有限公司 | 1、开发了高效的绿色环保型高耐久钢混组合梁桥防护材料，符合绿色可持续发展理念；2、将项目成果推广至工程应用。 |
| 孙克东 | 4 | 正高级工程师 | 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 |  1、对腐蚀钢板进行3D形貌扫描，得到微观形貌和力学退化性能的关系； 2、研究腐蚀作用下PBL连接件抗剪性能受力机理，建立其影响参数化的有限元数值模拟；3、腐蚀作用下PBL连接件抗剪承载力和荷载-滑移曲线公式分析；4、将项目成果推广至工程应用。 |
| 毕伟涛 | 5 | 高级工程师 | 陕西交控新材料有限公司 |  1、针对不用环境腐蚀特征，进行防护涂层材料配方研发，使防护涂层产品具备优异的环境适用性，从而保证在各种环境腐蚀作用下，具备良好的防护性能及耐候性，对桥梁结构起到长久有效的防护作用，符合绿色可持续发展理念； 2、将项目成果推广至工程应用。 |
| 郭丹 | 6 | 讲师 | 西安工业大学 | 1、通过拉伸试验分析腐蚀钢板的力学退化性能，开展腐蚀作用下栓钉和贯穿钢筋拉伸试验研究； 2、通过纳米渗透技术，实现底涂渗透层材料的高强渗透功能,有效阻止或延缓外界侵蚀介质对混凝土的破坏作用，减少混凝土耐久病害的发生，保证钢混组合梁桥中混凝土结构使用安全性及耐久性。 |
| 张浩 | 7 | 助理工程师 | 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 | 1. 对腐蚀钢板进行3D形貌扫描，得到微观形貌和力学退化性能的关系；对腐蚀钢板进行有限元分析，探究计算理论；

2、将项目成果推广至工程应用。 |

八、主要完成单位情况

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 单位名称 | 排名 | 对本项目贡献 |
| 西安工业大学 | 1 | 1、建立多因素腐蚀作用下钢-混凝土组合梁桥的桥梁钢力学退化分析模型和计算方法，揭示了腐蚀作用下钢材腐蚀程度与力学性能指标之间的关系并获得其本构关系；通过腐蚀钢板的金相试验，研究钢板内部微观组织形态的变化，分析了最大蚀坑系数与力学性能的关系；考虑到点蚀损伤对强腐蚀钢材延性的影响，建立了基于腐蚀时间的强腐钢材等效延性断裂准则。基于逆向重建技术将逆向获得的实体模型导入Abaqus与FE-safe平台，模拟分析腐蚀后试件的疲劳寿命。 2、建立多因素腐蚀作用下钢-混凝土组合梁桥的剪力键的失效机理，提高钢-混组合梁桥全寿命周期使用安全性及耐久性。本项目围绕腐蚀作用下钢混组合结构桥梁剪力连接件的力学性能研究，以掌握腐蚀作用下钢板梁剪力连接件力学退化性能演化规律为目的，在力学性能和抗剪性能等方面开展系统深入的研究。提出腐蚀作用下栓钉和PBL连接件连接件荷载-滑移曲线计算公式。深层次分析了腐蚀作用下钢-混凝土组合梁桥的剪力键的失效机理，提高钢-混组合梁桥全寿命周期使用安全性及耐久性。 3、开发了高效的绿色环保型高耐久钢混组合梁桥防护材料，符合绿色可持续发展理念。本项目采用纳米创新技术进行配方研发，形成的绿色环保型高耐久钢筋混凝土组合结构纳米防护材料。 |
| 陕西交控新材料有限公司 | 2 | 1、开发了高效的绿色环保型高耐久钢混组合梁桥防护材料，符合绿色可持续发展理念。 （1）通过纳米渗透技术，实现底涂渗透层材料的高强渗透功能。提高混凝土基面密实度及附着力，有效阻止或延缓外界侵蚀介质对混凝土的破坏作用，减少混凝土耐久病害的发生，保证钢混组合梁桥中混凝土结构使用安全性及耐久性。主要防护产品有混凝土桥梁防腐水漆、硅烷浸渍剂、混凝土护栏防腐水漆等。 （2）基于环境腐蚀特征分析及不用环境下钢混组合梁桥防护技术需求，将产品适用环境划分一般环境、工业环境、氯盐环境，进而针对不用环境腐蚀特征，进行防护涂层材料配方研发，使防护涂层产品具备优异的环境适用性，从而保证在各种环境腐蚀作用下，具备良好的防护性能及耐候性，对桥梁结构起到长久有效的防护作用，符合绿色可持续发展理念。主要防护产品有组合梁专用防水层、钢混组合胶等。 2、将项目技术和产品推广应用至工程实践中。并针对性做出维修决策，避免重大工程事故的发生，保证国民经济可持续稳定发展和减少经济损失。  |
| 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 | 3 | 1、在研究力学性能退化模型的基础上，对荷载与腐蚀性液体耦合作用下钢板组合结构建立有限元模型，分析不同腐蚀率与腐蚀时间下的正弯矩抗弯承载力衰减规律及失效机理，丰富和发展了钢-混组合梁桥的腐蚀计算理论。 2、建立栓贯穿钢筋连接件腐蚀率与腐蚀时间之间的定量关系模型，通过PBL连接件抗剪性能试验研究 ，研究了腐蚀作用下试件的抗剪性能退化规律。并拟合出抗剪承载力腐蚀系数因子，提出腐蚀作用下PBL连接件抗剪承载力的计算公式；根据推出试验结果建立了PBL连接件荷载-滑移曲线公式，并拟合出荷载-滑移曲线腐蚀系数因子，提出腐蚀作用下栓钉连接件荷载-滑移曲线计算公式。深层次分析了腐蚀作用下钢-混凝土组合梁桥的剪力键的失效机理，提高钢-混组合梁桥全寿命周期使用安全性及耐久性。 3、将项目技术和产品推广应用至工程实践中。并针对性做出维修决策，避免重大工程事故的发生，保证国民经济可持续稳定发展和减少经济损失。  |