陕西省科学技术进步奖公示

(2025年度)

成果登记号：9612022Y2467

一、项目基本情况

项目名称	隧道衬砌病害预警与修复材料关键技术
主要完成人	何文敏 彭磊 聂红宾 高妮 王永维 张新锦 燕波
主要完成单位	陕西铁路工程职业技术学院
所属国民经济行业	铁路工程建筑
所属陕西省重点发展领域	交通运输业
任务来源	□ 国家计划□ 国家基金□部委计划☑省级计划□省市基金 □委厅局和设区市级计划☑其他企业□ 国际合作□ 自选□其他
具体计划、基金的名称和编号： 1.陕西省自然科学研究计划1项:水力耦合作用下碳纤维废丝井壁导水通道形成机理及预警(2022JQ-420)。 2.陕西省教育厅专项科研基金2项:基于力敏特性的柔性支护压阻机理微观分析与预警(21JK0585);高速铁路隧道二次衬砌用带模注浆剂的研究(19JK0201)。 3.渭南市科技计划项目1项:极温环境下碳纤维废丝混凝土冻融损伤时变演化机理研究(ZDYF-JCYG-187)。 4.企业委托课题1项:高流动微膨胀高强充填砂浆的研究与应用(2017188)。	
已呈交的科技报告编号： 2022JQ-420、21JK0585、19JK0201、ZDYF-JCYG-187	

授权发明专利（项）	1	授权的其他知识产权（项）	9
项目起止时间：	起始：20215年1月1日	完成：2021年1月1日	

二、提名意见

<table>
<tr><td>提 名 者</td><td colspan="3">渭南市人民政府</td></tr>
<tr><td>通讯地址</td><td>渭南市科学技术局</td><td>邮政编码</td><td>714000</td></tr>
<tr><td colspan="4">提名意见：
项目依托陕西省自然科学研发计划1项、陕西省教育厅专项研究计划2项、渭南市重点研发计划1项等项目，形成一批具有自主知识产权的创新成果，已深度应用于银西高铁、西延高铁等国家重大铁路项目，相关技术路径对我国高速铁路、长大隧道等交通基础设施建设领域具有重要推广价值，对行业的技术进步和产业结构优化升级有巨大作用，具有广阔的应用前景和推广价值。主要创新成果如下：
（1）利用双剪统一强度理论建立了三个主应力影响下衬砌塑性发展模型，揭示了不同非均匀工况作用下衬砌变形破坏机理，有效解决了岩层空洞缺陷、富水等地质不良地段引起的结构损伤界定、范围误差大等难题。
（2）基于不同隧道衬砌类型，开发高韧性树脂修复材料、功能水泥基注浆材料和纤维混杂丝及裂缝专用片材，开发了适合普通硅酸盐和硫铝酸盐混凝水泥体系的（OPC-SAC）的功能外加剂，提出了一种纤维混杂丝及裂缝专用片材制备及加固方法。
（3）建立了隧道衬砌病害治理串、并联混合压阻模型，自主研制出衬砌压阻连续监测预警装置，基于“监测阈值与互联网+”模式建立了裂损细分、加固评价机制。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖三奖。</td></tr>
<tr><td colspan="4">提名项目奖励等级意向</td></tr>
<tr><td colspan="2">一等奖</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">二等奖</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">三等奖</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

三、项目简介

我国隧道总里程超5万公里，35%运营隧道出现衬砌开裂、渗漏水等病害，严重威胁结构安全，不仅影响交通通行，还埋下坍塌等事故隐患。传统预警依赖人工定期检测，周期长、漏判率高;修复材料如环氧砂浆粘结差、抗渗弱、耐久性不足，易复发，且未形成“预警-评估-修复”闭环。隧道衬砌病害预警与修复材料关键技术研究是保障隧道安全运维的必要举措。

该项目历时6余年，在多项省部级课题的持续资助下，对铁路隧道衬砌开裂渗水现象、隧道发病机制与裂缝治理进行了一系列的研究，取得了具有科学价值的创新成果。主要创新点包括：

1.复杂地质环境下隧道衬砌结构变形破坏机理研究。针对复杂地质环境作用下隧道衬砌裂损治理问题，以破坏岩体为模型，将岩层缺陷应力、高压水等作用因素等效为非连续边界荷载，按照太沙基理论提出了非连续边界影响下围岩压力计算方法。利用双剪统一强度理论建立了三个主应力影响下衬砌塑性发展模型，揭示了不同非均匀工况作用下衬砌变形破坏机理，有效解决了岩层空洞缺陷、富水等地质不良地段引起的结构损伤界定、范围误差大等难题。

2.基于不同隧道衬砌类型，开发高韧性树脂修复材料、功能水泥基注浆材料和纤维混杂丝及裂缝专用片材。针对隧道病害修复材料出现的环氧树脂注浆材料（A、B组分）易剥落、OPC-SAC水泥基修复材料流变控制难和纤维加固整体强度不足等问题，利用超支化聚合物改性固化剂制备高粘结的环氧树脂注浆材料，开发了适合普通硅酸盐和硫铝酸盐混凝水泥体系的（OPC-SAC）功能外加剂，提出了一种纤维混杂丝及裂缝专用片材制备及加固方法。

3.基于碳纤维废丝超高导电性的隧道结构性态感知及评价。针对衬砌裂损及加固后结构性态感知难题，通过裂损机理、碳纤维废丝喷射/内贴细观试验及单根纤维变形特征，建立了隧道衬砌病害治理串、并联混合压阻模型，自主研制出衬砌压阻连续监测预警装置，基于“监测阈值与互联网+”模式建立裂损细分、加固评价机制，实现了隧道衬砌病害治理的智能评价。

本项目授权发明专利1项、实用新型专利1项，参编团体标准1项，发表相关论文7篇，其中SCI、EI、CSCD收录4篇，形成了材料研发、生产到工程应用的成套技术。西北工业大学李克智教授、西安轨道交通集团有限公司教授级高工杨晓强等组成的评审委员会认为，本项目成果总体达到国内领先水平。建成年产1万吨生产线1条，高铁隧道充填砂浆制备技术已分别应用于银西客专贾源隧道、弥蒙铁路中哨隧道、兴泉铁路灯峰隧道、贵南铁路朝阳隧道等12个国家重大工程建设项目中的20多座隧道，获得用户高度评价。利用碳纤维废丝对衬砌病害进行

治理实现变废为宝，低碳环保，值得推广；实践表明，利用碳纳米改性纤维治理后的复合衬砌，承载力提高15%，治理费用降低10%，对10mm~20mm之间的裂缝治理效果良好，技术达到国际先进水平。

该项目研究主要针对铁路隧道衬砌病害及修复问题，其研究成果同样适于我国公路隧道及深井巷道建设，可显著提高结构服役寿命，具有巨大的经济、社会和环境效益，应用前景广阔。

四、客观评价

本项目聚焦隧道衬砌病害预警与修复材料关键技术研究，围绕隧道二次衬砌注浆结合料制备与工程应用、碳纤维废丝高值化利用等核心技术展开攻关，形成了涵盖材料研发、工艺创新、设备优化及标准制定的全链条核心知识产权体系，在技术突破、工程实践与行业影响等方面取得显著成效。

客观评价之一：科技查新[成果支撑：附件17]

2021年11月“高速铁路隧道二次衬砌注浆结合料制备与工程应用成套技术”通过教育部科技查新工作站查新。结果证实，该成果在注浆结合料制备工艺及工程应用技术方面具有独创性，核心技术未在国内外公开文献中发现相同报道，奠定技术新颖性与领先性基础。

2021年1月，关于碳纤维废丝高值化利用技术成果在郑州鉴定时，经相关专家评审认定，利用碳纤维废丝对衬砌病害进行治理的技术，在废旧纤维高值化利用方面极具创新性，技术达到国际领先水平，相关鉴定材料详见附件。

客观评价之二：评审委员会鉴定[成果支撑：附件18、20]

注浆结合料技术成果鉴定：由西北工业大学李克智教授、长安大学王振军教授、西安建筑科技大学李国新教授等组成的评审委员会，对注浆结合料技术评审后认为：项目拥有从材料研究到产品生产和应用的全部自主知识产权，在超支化减缩剂、功能外加剂研究领域达到国内领先水平，总体技术水平达国内先进；国家金属制品质量监督检验中心及中国中铁航空港建设集团有限公司试验检测中心检测显示，材料性能指标完全满足《隧道衬砌拱顶带模注浆技术要求》规范，部分性能代表本领域最高水平。

碳纤维废丝利用技术成果鉴定：我国川藏铁路隧道组专家、中国中铁一级专家、俄罗斯外籍院士陈馈教授级高工等专家对碳纤维废丝利用技术成果进行了鉴定，指出废旧纤维高值化利用意义重大，利用碳纤维废丝对衬砌病害进行治理实现变废为宝，低碳环保，值得推广；实践表明，利用碳纳米改性纤维治理后的复合衬砌，承载力提高15%，治理费用降低10%，对10mm~20mm之间的裂缝治理效果良好，技术达到国际领先水平，专家鉴定意见详见附件。

客观评价之三：标准委员会立项[成果支撑：附件1]

项目组联合中铁十二局集团、中国建筑科学研究院等单位，牵头制定T/CECS《隧道衬砌拱顶带模注浆材料应用技术规程》，并通过国家标准委员会立项。该规程体现了技术在材料设计、施工工艺等方面的系统性与规范性，凸显了项目成果在行业标准体系建设中的主导地位，为注浆结合料技术的标准化推广提供权威依据。

客观评价之四：应用单位实践反馈[成果支撑：附件19、22-27]

本项目成果在多个工程中进行广泛应用，成效显著。注浆结合料技术于贵南客专、银西铁路等20余条线路使用后，获多方认可。西安市轨道交通集团杨晓强（教授级高工）证实其有效改善堵管问题，应用效果优于同类产品；中铁一局吴龙（高级工程师）指出材料对复杂地质适应性强，显著改善拱顶脱空问题，耐久性突出；广州轨道监理公司张世杰表明“原位生产”模式降低成本47.5%。与国内同类产品相比，该注浆结合料在结合性、塑性膨胀率、28天抗压强度等关键指标上显著提升。

碳纤维废丝利用技术同样表现优异。多因素耦合验算方法应用于西成铁路石林隧道结构验算，使围岩压力降低14.9%，节省12%支护材料；二衬裂缝治理工艺应用于川藏铁路拉林段三座隧道应急处置，其中V型裂缝加固后衬砌承载力提升17%（较常用碳纤维复合片材提高2%），K型裂缝承载力提高24%（较锚杆加固方法提升14%）；初期支护性能提升技术应用于川藏铁路色季拉山隧道，实现耐久性提高40%、围岩封闭率提升70%、试块抗拉强度提高210% 等多项性能提升。此外，2021年11月，山东诺一工程科技有限公司应用碳纤维废丝病害治理技术及评价系统，结合相关专利技术，成功攻克加固过程中的关键技术难题，应用方对感知系统高度评价，期望在全国范围推广应用。

五、应用情况和效益

1．应用情况

项目形成了铁路隧道衬砌病害预警与修复材料关键技术，研究成果全部转化为生产力，建成年产1万吨生产线1条，高铁隧道充填砂浆制备技术已分别应用于弥蒙铁路中哨隧道、兴泉铁路灯峰隧道等12个国家重大工程建设项目中的20多座隧道工程，直接经济效益上千万元，见表1，有力推动我国高速铁路隧道二次衬砌病害预警与修复材料的发展与应用。

表 1 应用情况

序号	应用单位名称	应用技术	应用时间	应用单位联系人电话	应用情况
1	中铁一局五公司银西铁路	采用超支化聚合物改性固化剂制备了高粘结的环氧树脂注浆材料	2021 年 7 月-2024 年 12 月	孙耀国 13020719543	采用超支化固化剂降低注浆材料黏度，流动性达到 380mm 以上，增强浆料可泵性，解决易堵管等问题。
2	中铁十二局四公司兴泉铁路	微膨胀大流动早强高强充填砂浆	2018 年 3 月-2024 年 12 月	宋小兵 13309290588	二次衬砌后 12cm 空洞进行注浆修复，一次注浆饱满率 98%，较传统硫铝酸盐浆体材料节省水泥 280t，成本节约 320 万元。
3	中铁十二局四公司弥蒙铁路	微膨胀大流动早强高强充填砂浆	2019 年 5 月-2020 年 4 月	张恒亮 18602936287	注浆结束后，经过测试，24h 抗压强度达 19MPa、抗折强度达 4.5MPa，28 天抗压强度达 52MPa、抗折强度达 12.6MPa。
4	中铁一局集团第三工程有限公司沪昆高铁	超支化聚合物改性环氧注浆料	2023 年 8 月-2023 年 12 月	宋小兵 13309290588	6h 内完成注浆，界面粘结强度由提高 55%），堵管率下降 25%，成本降低 30%。
5	西安科技大学建筑病害治理研究所	碳纤维废丝改性及力学性能检测	2020 年 7 月-2020 年 12 月	谷拴成 13991880126	采用绝缘树脂对碳纳米改性的碳纤维废丝织物进行包裹固化，与同类未改性废丝相比:实验导电率提高了 120%。
6	山东诺一工程科技有限公司	碳纤维废丝加固 K、V 型二衬裂缝治理	2020 年 10 月-2021 年 12 月	仪孝东 18063428866	采用碳纤维废丝混凝土对二次衬砌结构病害进行治理及加固 30 处。经处治 7 天后测试其内力及变形可知:加固前后承载力

					可提高 17%以上，挠度减小 20%，顺利同验收。
7	中铁第一勘察设计院集团有限公司桥梁隧道设计院	高原多因素耦合压力计算方法和全主应力影响下衬砌结构塑性检算	2020 年 11 月-2022 年 12 月	何永旺 029-82365351	采用三轴主应力衬砌结构验算方法，比传统单应力计算得到的塑性损伤范围增加了约 20%，节省了约 10%的支护材料。
8	中铁隧道集团有限公司新建川藏铁路雅安至林芝段 CZXZZQ-2 标项目	碳纤维废丝喷射混凝土初支应用	2020 年 11 月-2022 年 10 月	王乐乐 15093357763	工程中采用碳纤维废丝混凝土后，较好的克服了因钢纤维生锈造成的喷射，初期支护耐久性提高了 40%，支护强度提高了 30.1%,工作效率提高了 20%。

2．经济效益和社会效益

课题研究进行了成果转化，在川藏铁路等国家重要大工程中得到了应用。提出了非连续边界影响下围岩压力计算方法，研制了高粘结的环氧树脂注浆修复材料和碳纤维废丝喷射混凝土材料，形成了隧道衬砌病害预警与修复材料的关键技术，有效解决了隧道衬砌开裂渗水现象、隧道发病机制分析与裂缝治理的难题，形成了“预警-评估-修复”闭环，极大减少后期运营引起拱顶开裂、渗水等病害，减少了对列车运行造成的安全隐患。产生的经济效益和社会效益如下:

（1）与传统隧道二次衬砌充填砂浆性能相比，生产功能型注浆剂仅占材料总量7%，充分利用现场砂、水泥等材料，降低了运输成本、现场砂无需烘干，节能环保保质期更长。

（2）按一吨注浆料节省成本1000元计算，每公里隧道平均用注浆料200吨，则隧道注浆可节省成本约20万元/公里。

（3）对空洞、富水段隧道按“非连续边界+双剪模型”精准计算，衬砌加厚范围平均缩减30%，单公里节省混凝土约1200m^3、钢材280t，直接造价降低650万元/公里。

（4）在裂缝的治理过程中，采用碳纤维废丝进行加固处理，对弯裂缝加固前后承载力提高了17%，与传统碳纤维复合片材加固相比，承载力相差不到2%的前提下，为企业创造利润300万元。对剪裂缝，加0固前后承载力提高了24%，与传统锚杆加固方法相比，承载力提高了14%，为企业创造利润124万元。

（5）在应急处置过程中，按照裂缝成因细化了分类，提高了30%的工作效率每班次节省1名技术人员，直接为企业节省150万元劳务费。

六、主要知识产权证明目录

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	标准	隧道衬砌拱顶带模注浆材料应用技术规程	中国	T/CECS 1049-2022	20220801	T/CECS 1049-2022	中国工程建设标准化协会	彭磊
2	论文	Ultimate bearing capacity analysis of CFRP-strengthened shield segments using bonding slip behavior experiments	中国	https://doi.org/10.3390/ma13184200	20200901	Materials SCI、EI	陕西铁路工程职业技术学院	聂红宾、谷拴成
3	发明专利	一种超支化减缩剂的制备方法	中国	ZL201710679223.9	20201124	201710679223.9	陕西铁路工程职业技术学院	彭磊、何文敏、王闯等
4	论文	功能外加剂对隧道二次衬砌拱顶充填砂浆性能的影响	中国	2021,58(05):244-251	20210503	现代隧道技术 CSCD	陕西铁路工程职业技术学院	彭磊、何文敏、高妮
5	论文	极温冻融-荷载作用下碳纤维复合材料修复试件损伤分析	中国	2021,51(06):2108-2120	20210728	吉林大学学报（工学版）EI	陕西铁路工程职业技术学院	聂红宾、谷拴成
6	论文	寒区碳纤维增强混凝土抗冻性能试验研究	中国	2020,(05):46-50	20200430	混凝土与水泥制品中文核心	陕西铁路工程职业技术学院	聂红宾、谷拴成、高攀科、张建鹏
7	论文	超支化减缩剂的合成与性能研究	中国	2017,44(09):74-78	20170925	新型建筑材料中文核心	陕西铁路工程职业技术学院	彭磊、何文敏
8	论文	PCE复配优化对水泥砂浆孔结构的影响	中国	2021,48(02):100-105	20200903	新型建筑材料中文核心	陕西铁路工程职业技术学院	王永维、何文敏
9	论文	非连续边界荷载影响下隧道围岩压力计算方法	中国	2022,42(08):1435-1442	20220820	隧道建设（中英文）CSCD	陕西铁路工程职业技术学院	聂红宾、谷拴成
10	实用新型专利	用于单孔法测隧道围岩松动圈厚度的测试装置	中国	ZL202221750021.1	20221004	17521901	陕西铁路工程职业技术学院	张新锦、燕波、彭磊、王永维等

七、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
何文敏	1	科技处副处长	教授	陕西铁路工程职业技术学院	陕西铁路工程职业技术学院	项目负责人，对创新点1、2、3做出了重要贡献，是第3项发明专利、第4、7、8项论文的作者
彭磊	2	无	副教授	陕西铁路工程职业技术学院	陕西铁路工程职业技术学院	项主要参与人员，对创新点1、2做出了重要贡献，是第1项标准、第3项发明专利、第4、7项论文、第10项实用新型专利的作者
聂红宾	3	无	副教授	陕西铁路工程职业技术学院	陕西铁路工程职业技术学院	项目主要参与人员，对创新点1、3做出了重要贡献，是第2、5、6、9项论文的作者
高妮	4	无	副教授	陕西铁路工程职业技术学院	陕西铁路工程职业技术学院	项目参与人员，对创新点2做出了重要贡献，是第4项论文的作者
王永维	5	实践教学科科长	高级工程师	陕西铁路工程职业技术学院	陕西铁路工程职业技术学院	项目参与人员，对创新点1做出了重要贡献，是第8项论文、第10项实用新型专利的作者
张新锦	6	无	副教授	陕西铁路工程职业技术学院	陕西铁路工程职业技术学院	项目参与人员，对创新点3做出了重要贡献，是第10项实用新型专利的作者
燕波	7	无	讲师	陕西铁路工程职业技术学院	陕西铁路工程职业技术学院	项目参与人员，对创新点2做出了重要贡献，是第10项实用新型专利的作者

八、主要完成单位情况

完成单位	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献
陕西铁路工程职业技术学院	1	作为“隧道衬砌病害预警与修复材料关键技术”项目的主要完成单位，陕西铁路工程职业技术学院在陕西省自然科学研究计划、陕西省教育厅专项科研基金、渭南市科技计划项目等的资助下，开展了较为系统深入的研究，负责制定项目总体方案、技术路线、研究内容和目标，负责为项目研究创造良好的环境、提供设备、试验条件、保证科研资金投入等，对项目的创新和应用做出了重要贡献

九、完成人合作关系说明

在“隧道衬砌病害预警与修复材料关键技术研究”项目中，何文敏作为项目主持人，全面统筹项目研究方向与进程，与彭磊、聂红宾、高妮、张新锦、王永维、燕波等完成人开展了多维度、紧密且深入的合作。

2015~2021 年，在何文敏主持下，团队凭借“高速铁路隧道二次衬砌注浆结合料制备与工程应用成套技术”，获 2021 年高校科学技术成果奖二等奖；2016~2018 年，何文敏、彭磊、高妮合作探究“功能外加剂对隧道二次衬砌拱顶充填砂浆性能的影响”及“超支化减缩剂的合成与性能研究”，高妮主持教育厅专项课题“高速铁路隧道二次衬砌用带模注浆剂的研究（19JK0201）”，彭磊主持陕西省高性能混凝土工程实验室专项课题“超支化功能减缩剂性能研究（G2015-04）”，授权发明专利“一种超支化减缩剂的制备方法”。

2018 年开始，聂红宾参与“隧道二衬带模注浆料研发与产业化”研究工作，参与产业化相关的市场调研与生产流程优化；王永维参与开展“PCE 复配优化对水泥砂浆孔结构的影响”研究，参与技术研讨及数据处理；2021 年以来，张新锦、燕波开始参与装置结构设计与实验验证，授权专利“用于单孔法测隧道围岩松动圈厚度的测试装置”。

在何文敏的主持引领下，各成员充分发挥专业优势，通过长期紧密合作，为项目取得国内领先、部分技术达国际先进水平的成果提供了有力支撑。

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	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	共同获奖	何文敏/1、彭磊/2、高妮/3、王永维/5	2015-2021	2021 年	2021 年高校科学技术成果奖二等奖：高速铁路隧道二次衬砌注浆结合料制备与工程应用成套技术	获奖证书
2	专利合著	彭磊/1、何文敏/2	2015-2018	2020 年	发明专利：一种超支化减缩剂的制备方法	专利
3	专利合著	张新锦/1、燕波/2、彭磊/3、王永维/7	2021-2022	2022 年	发明专利：用于单孔法测隧道围岩松动圈厚度的测试装置	专利
4	合作论文	彭磊/1、何文敏/2	2016-2018	2018 年	功能外加剂对隧道二次衬砌拱顶充填砂浆性能的影响	论文
5	合作论文	彭磊/1、何文敏/2	2015-2016	2016 年	超支化减缩剂的合成与性能研究	论文
6	合作论文	彭磊/1、何文敏/2、高妮/5	2015-2021	2021 年	功能外加剂对隧道二次衬砌拱顶充填砂浆性能的影响	论文
7	合作论文	王永维/1、何文敏/5	2017-2018	2018 年	PCE 复配优化对水泥砂浆孔结构的影响	论文
8	合作课题	高妮/1、何文敏/2、彭磊/3	2016-2018	2018 年	教育厅专项课题：高速铁路隧道二次衬砌用带模注浆剂的研究(19JK0201)	课题
9	合作课题	彭磊/1、何文敏/2、高妮/3	2015-2018	2018 年	陕西省高性能混凝土工程实验室专项课题：超支化功能减缩剂性能研究(G2015-04)	课题
10	合作课题	何文敏/3、彭磊/4、高妮/6、聂红宾/7	2018-2019	2019 年	横向课题：隧道二衬带模注浆料研发与产业化	课题