

项目合同编号：25-34K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究

承担单位：长安大学

项目负责人：王苗苗

通讯邮编、地址：西安市碑林区文艺南路长安大学

传真、电话：13572501221

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：25-34K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究

承担单位：长安大学

项目负责人：王苗苗

通讯邮编、地址：西安市碑林区文艺南路长安大学

传真、电话：13572501221

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

一、项目主要研究内容

1.主要研究内容

(1) 特长公路隧道瓷砖釉面污染物组份及分布规律

选取秦岭终南山隧道(全长约 18.02 公里)作为典型研究对象,采用多点位实时采样的方法,对隧道内 CO、NO_x 等气体成分的梯度测试工作,分析特长隧道内主要有害气体浓度的分布特征,测试隧道侧壁瓷砖表面污染物成分,为隧道环境治理与维护提供了数据依据。

(2) 特长公路隧道内壁瓷砖釉面污染损伤机制

为揭示隧道侧壁瓷砖釉面在酸性环境下的损伤机制,通过室内模拟试验揭示硫酸侵蚀及酸性清洗剂-机械刷洗耦合作用对隧道瓷砖釉面的损伤机制。采用 pH=1-2 硫酸溶液进行 7-21 天加速侵蚀,结合氢氟酸/草酸/盐酸清洗剂与机械刷洗循环实验,分析釉面微观形貌、损伤率、成分迁移及光泽度演变。

(3) 隧道内壁瓷砖釉面恢复涂层的基本性能研究

通过基础性能试验评估涂层材料特性,确保其在隧道环境中实现长效防护,从而延长瓷砖釉面服役寿命。实验选取外墙防水乳胶漆(建筑常规防护材料)、醇酸树脂涂料(传统防护体系)及防污自洁型涂料三类典型涂层进行对比,通过耐化学腐蚀性、湿热性、耐候性等指标测试,分析不同防污自洁型体系的性能及对瓷砖釉面的防护机理。

(4) 隧道侧壁瓷砖釉面恢复施工工艺及质量检测

针对隧道侧壁瓷砖损伤后釉面采用防污自洁涂料进行修复，旨在有效提高瓷砖釉面光洁度，改善后期养护清洁难的现状。施工中经反复总结探索、深入研究，最终提炼形成隧道瓷砖釉面恢复的施工工艺，为隧道长效维护与景观优化提供技术支撑。

2.技术关键

(1) 根据气体分布特征，确定隧道瓷砖釉面劣化的主要影响因素，通过试验及理论分析，得出特长公路隧道瓷砖釉面劣化机理及劣化规律。

(2) 考虑运营公路隧瓷砖釉面及隧道内污染严重等特点，开发出经济有效的公路隧道瓷砖防腐防污涂层体系，提高隧道内司乘的视觉效果，保证行车安全。

3.依托工程（依托工作）

秦岭终南山公路隧道是世界最长的双洞高速公路隧道，单洞全长 18.02 公里，按双向车道高速公路标准建设。极大的长度增加了隧道的封闭性，容易导致行车排放的有害气体积聚，使得隧道内有害气体的浓度远远高于一般隧道。同时，汽车尾气携带的热量和水汽也不易排出隧道，使得隧道内的温湿度普遍较高，加快了有害气体对瓷砖釉面的侵蚀。

其次，隧道运营期汽车尾气排放的油污、环境中粉尘、碳氢化合物和氮氧化物等污染介质含量较高，因常规瓷砖防污染性能较弱，易引起隧道侧壁严重污染，反射率降低，影响路容路貌和通行环境。隧道日常维护中，瓷砖表面清洗难度大，频次高，增加了日常养护

的费用和工作量。为最大限度的提升清洗效果，隧道清洗需添加酸碱等清洗剂进行处理，长期使用容易引起隧道侧壁瓷砖釉面的腐蚀破坏及周围环境的二次污染，影响其使用寿命。

二、考核指标

1.预期目标

(1) 通过工程调查及现场测试,明确公路隧道气体环境分布特征及污染物组成成份;

(2) 根据室内瓷砖釉面试验结果提出隧道瓷砖釉面劣化机理及防护要求;

(3) 开发出适合隧道瓷砖釉面恢复的防护涂层,有效改善司乘的视觉效果,提高行车安全。

2.主要技术经济指标(具体的技术经济参数)

(1) 釉面漆膜平整均匀,无流挂、漏喷、起泡、针孔等缺陷;附着力 $\geq 2\sim 3\text{MPa}$ 、耐老化性能 $\geq 2500\text{h}$ 、绿色环保 $\text{VOC}\leq 300$ 等要求。

(2) 结合依托工程实施,编制出公路隧道瓷砖釉面恢复设计与施工技术指南。

3.经济和社会效益

秦岭终南山隧道侧壁施工期间采用了瓷砖进行装饰,经过长时间运营后,由于洞内酸性环境腐蚀作用,目前隧道侧壁瓷砖污染严重,视觉效果降低,存在一定的安全隐患,且清洗过程中,为保证清洗效果,需加入适量酸性液体,长期使用酸性液体容易引起瓷片和隧道混凝土的腐蚀破坏及周围环境的污染。

采用本课题研究成果,经济效益也非常显著。隧道运营期间,以瓷砖为底材,采用专用涂层对瓷砖釉面进行恢复后,清洗过程中,

无需添加任何清洗剂，对原隧道结构无腐蚀且绿色环保。此外，以往隧道瓷砖清洗耗费大量人工且影响正常通行时间相对较长，对瓷砖釉面恢复后采用自动化专用设备清洗，效率高，影响通行时间短，社会效益显著。

4.成果提供形式

(1) 研究报告：在役公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究

(2) 技术指南：公路隧道瓷砖釉面恢复设计与施工技术指南

(3) 涂层体系：开发出瓷砖釉面恢复涂层结构及相应材料

(4) 实体工程：对依托工程隧道侧壁瓷砖进行釉面恢复，并进行长期跟踪观测，制定实体施工验收标准。

(5) 研究成果达到国内领先水平，在国内外核心学术期刊上发表论文 1-2 篇，申请专利 1 项。

5.其他考核指标

(1) 培养工程技术人员 3-5 名；

(2) 开展技术交流不少于 1 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026 年 3 月 至 2026 年 8 月	对不同区域公路隧道进行现场调研，统计隧道侧壁瓷砖污染状况，分析污染物主要成份及产生的原因，确定涂层开发方向。 阶段目标：提交调研报告
2026 年 9 月 至 2027 年 2 月	根据隧道瓷砖底材特点，开发对应的涂层底漆、中间漆及面漆；对运营阶段隧道侧壁瓷砖釉面恢复进行施工，总结基底处理施工工艺；综合考虑底材、涂层等特性，推荐涂层结构及相应材料。 阶段目标：开发出适宜于隧道侧壁瓷砖防腐防污涂层材料，推荐出瓷砖釉面恢复适宜的涂层结构。
2027 年 3 月 至 2027 年 8 月	选取典型隧道进行瓷砖釉面涂层施工，通过试验确定基底处理及涂层喷涂工艺，制定涂层施工质量验收标准，编制隧道瓷砖釉面恢复设计与施工技术指南。 阶段目标：对典型隧道侧壁瓷砖进行涂层施工；编制出隧道瓷砖釉面恢复设计与施工技术指南。
2027 年 9 月 至 2028 年 2 月	编制研究成果报告及其他有关文件，申请组织验收。

四、项目经费

项目总经费：40.00 万元
交通运输厅补助：19.79 万元
自筹资金：20.21 万元

经费支出预算表

科 目	总经费 (单位：万元)	厅补经费 (单位：万元)
(一) 直接费用	37	16.79
1. 设备费	2	2
(1) 购置设备费	1	1
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	1	1
2. 业务费	30	9.79
(4) 材料支出	1	1
(5) 测试化验实验加工支出	2	2
(6) 燃料及动力支出	2	2
(7) 差旅支出	1	1
(8) 会议支出	1.79	1.79
(9) 国际合作与交流支出	1	1
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	1	1
(11) 其他支出（依托工程实施）	20.21	
3. 劳务费	5	5
(12) 劳务性支出	3	3
(13) 咨询专家支出	2	2
(二) 间接费用	3	3
4. 管理费	2	2
5. 绩效支出	1	1
合 计	40	19.79

注：预算编制按照《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发〔2022〕3号）文件执行。项目验收将组织财务专项验收或审计。可参考《陕西省交通运输厅科研项目经费决算报告参考格式说明》

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	1
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	1
		4.著作（部）	
		5.制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	1
		2.获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3.其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	1
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	是
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2. 培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4. 是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2. 科研仪器设备利用率（%）	
		3. 孵化科技型企业（个）	
		4. 转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	带动运营公路隧道养护行业高质量
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	
		10. 环保效益	
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

(1) 长安大学负责课题研究大纲的制定及可行性报告编制工作，开展涂层基本性质试验、瓷砖釉面损伤及恢复试验、釉面恢复现场施工及质量检测等方面的研究工作，整理研究成果，编制研究报告及技术指南，完成各个阶段项目评审工作。

(2) 陕西交通控股集团有限公司西镇公司协调落实依托工程，参与涂层材料开发及釉面损伤、恢复试验，指导依托工程瓷砖釉面恢复现场施工，审查课题研究成果，协助项目评审工作。

(3) 西安公路研究院有限公司参与研究方案的制定及技术交底工作，参与涂层材料开发及釉面损伤、恢复试验，参与编制依托工程瓷砖釉面恢复施工方案，指导现场瓷砖釉面恢复施工及质量控制，协助项目评审工作。

七、项目参加人员表

项目承担单位：长安大学 参与单位（排序）：陕西交通控股集团有限公司西镇公司 西安公路研究院有限公司						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目担任具体工作
1	王苗苗	1986-10-05	长安大学	副高级	隧道工程	研究大纲及试验方案编制，组织涂层材料开发及室内外试验，编制研究报告及技术指南。
主要研究人员						
2	周志军	1975-01-06	长安大学	正高级	隧道工程	编制研究大纲，制定试验方案，负责项目进度及阶段成果审核，组织课题验收。
3	安 达	1974-10-06	陕西交通控股集团有限公司西镇分公司	中级	其他	参与研究大纲制定，协调现场测试及依托工程实施，参与课题验收。
4	石雄伟	1976-09-29	西安公路研究院有限公司	正高级	桥梁工程	参与研究大纲制定，指导室内外试验、依托工程施工及技术指南编制。

5	屈波	1976-09-27	陕西交通控股集团有限公司 西镇分公司隧道管理中心	副高级	隧道工程	参与试验方案制定，协调现场测试及 依托工程实施。	屈波
6	苗建宝	1987-10-05	西安公路研究院有限公司	副高级	桥梁工程	参与涂层材料的开发及性能试验；指 导依托工程涂层施工。	苗建宝
7	张 岷	1985-08-19	陕西交通控股集团有限公司 西镇分公司	副高级	隧道工程	协助现场测试及依托工程施工；参与 编制涂层施工技术指南。	
8	任钊铎	2001-10-26	长安大学	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试 验及涂层性能试验，整理研究报告。	任钊铎
9	任展腾	2000-05-04	长安大学	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试 验及涂层性能试验，整理研究报告。	任展腾
10	李 路	2002-04-27	长安大学	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试 验及涂层性能试验，整理研究报告。	李路
11	赵 袁	2002-02-27	长安大学	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试 验及涂层性能试验，整理研究报告。	赵袁
12	陈伊喆	2002-08-20	长安大学	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试 验及涂层性能试验，整理研究报告。	陈伊喆
13	许 慧	2000-05-20	长安大学	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试 验及涂层性能试验，整理研究报告。	许慧
14	朱林檀	1996-03-18	长安大学	中级	隧道工程	依托工程环境测试及污染物取样分 析，隧道环境数值模拟。	朱林檀
15	许麦扎	1996-01-04	长安大学	助理级	隧道工程	现场气体分布测试及数据分析、涂层 材料开发及性能测试。	许麦扎

八、信息表

项目合同编号		25-34K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部		
项目名称		运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究								
项目实施所在地		西安		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月				
总 经 费		40		厅 拨		19.79				
第一承担单位	单位名称	长安大学								
	所在地	陕西省西安市雁塔区					代码	610112		
	通讯地址	陕西省西安市碑林区文艺南路长安大学					邮编	710064		
	单位性质	(1) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	10710		
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1	陕西交通控股集团有限公司西镇公司								
	2	西安公路研究院有限公司								
	3									
项目负责人		姓 名	王苗苗		性 别 (2) 1.男 2.女		出生年份	1986		
		学 历	(1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他							
		职 称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他							
		联系电话	15202934216		电子邮箱		wmmcugb@163.com			
项目联系人		姓 名	周志军		性 别		男			
		联系电话	13572501221		电子邮箱		5974100@qq.com			
项目组人数		16	高级	6	中级	2	初级	8	其他	
主要研究内容 (100 字以内)		(1) 特长公路隧道瓷砖釉面污染物组份及分布规律 (2) 特长公路隧道内壁瓷砖釉面污染损伤机制 (3) 隧道内壁瓷砖釉面恢复涂层的基本性能研究 (4) 隧道侧壁瓷砖釉面恢复施工工艺及质量检测								
成果属性		C	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他							
成果形式		A、D	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

1.合同执行过程中，乙方如需修改合同某项条款，应向甲方提出变更内容及理由的申请报告，经甲方审核同意后实施。未接到正式批准以前，双方仍须按原合同条款履行，否则后果由自行修改条款的一方负责。

2.乙方因任何主观或客观原因（如：与大纲评审内容有出入，挪用经费、技术措施或某种条件不落实等）致使计划无法执行而要求解除合同的，需取得甲方书面同意且应视不同情况，部分或全部退还所拨经费；出现上述情况的，甲方有权单方解除本合同且视不同情况要求乙方部分或全部退还所拨经费。

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

5.项目完成后，乙方必须按要求向甲方提交一套真实、完整、详细的技术资料及样机，并提出项目验收申请报告，由甲方审查后组织验收。

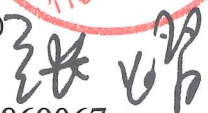
6.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：陕西省交通运输厅

负责人：(签字)  2026年3月31日

联系人：(签字)  (公章)

电话：029-88869067

合同乙方：长安大学 

单位负责人：(签字)  2026年3月31日

项目负责人：(签字)  (公章)

电话：15202934216 2026年03月31日

财务负责人：(签字) 

账户名：长安大学

开户银行：中国银行西安翠华路支行

账号：102007335073

陕西交通科技项目科研诚信 承诺书

本单位承诺在科研项目实施过程中，遵守科学道德和科研诚信要求，严格执行《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》的规定和科技项目合同书约定，保证所提交材料的真实性，确保专款专用。如违背以上承诺，愿意承担相关责任，并同意主管部门将相关失信信息记入公共信用信息系统。

项目承担单位：(盖章)

项目负责人：

年 月 日

2026年 03月 31日

项目编号：25-34K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究

申请单位：长安大学，陕西交通控股集团有限公司西
镇公司，西安公路研究院有限公司

联系人：王苗苗

电 话：15202934216

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

目录

一、 项目研究的背景和必要性	1
二、 前期科研及工作基础	3
2.1 国内外研究现状	3
2.1.1 公路隧道污染物及分布特征	3
2.1.2 公路隧道侧壁瓷砖污染及损伤机制	9
2.1.3 隧道内壁瓷砖釉面恢复	11
2.1.4 现有研究不足	13
2.2 工作基础	14
2.3 开展试验所具备的技术条件	18
2.4 参考文献	19
三、 实施方案	32
3.1 拟解决的关键问题	32
3.2 主要研究内容及实施方案	33
3.2.1 研究内容	33
3.2.2 实施方案	34
3.3 技术路线	61
3.4 后续技术改造	61
3.5 有关技术经济指标	62
四、 项目承担单位及参加单位概况	62
4.1 单位概况	62
4.2 技术力量及人员构成	65
4.3 承担的主要工作	66
4.4 项目主要负责人情况	67
五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	68
5.1 依托工程概况	68
5.2 投资来源	69
5.3 组织管理形式	70
六、 项目经费估算及资金筹措情况	71

七、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	72
7.1 项目预期目标	72
7.2 最终提交的研究成果及其形式	72
7.3 经济、社会、环境效益分析	72
八、 其它需要说明的问题	74
九、 申请单位意见	75

运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理 及恢复技术研究

一、项目研究的背景和必要性

我国公路隧道经过 20 年的高速发展，截止 2023 年底，全国公路隧道 27297 处、3023.18 万延米，其中特长隧道 2050 处、924.07 万延米^[1]。现代公路网络中，公路隧道是不可或缺的一环。对我国经济发展起着重要的作用。然而，随着隧道投入运营的时长不断增长，绝大多数隧道都呈现出或轻或重的污染状况，同时伴有不同程度的损伤。其中，公路隧道侧壁釉面瓷砖作为运营期，维护管理的一部分，在汽车尾气、粉尘颗粒、侵蚀离子等因素的作用下，瓷砖的釉面发生性能下降，导致釉面结构的耐久性劣化（图 1.1），缩短了使用年限，甚至对隧道运营行车安全和人身安全造成危害。因此，瓷砖的釉面作为直接与隧道环境相接触的结构物，其耐久性问题需要引起人们的重视^[2,3,4]。

在实际应用中，高速公路中的隧道开展了内壁瓷砖装饰工程。中短隧道主要通过侧壁粘贴瓷砖的方式进行装修，而长及特长隧道，其进口段的 50 米同样采用侧壁粘贴瓷砖的做法^[5]。经过近十多年的运营，隧道内壁瓷砖装饰存在的问题逐渐显露出来。一方面，为了能有效去除隧道侧墙釉面污垢，瓷砖釉面清洗一般需要添加酸性成分的液体，易引起瓷砖的腐蚀破坏及周围环境的污染；隧道常规装饰材料清洗会耗费大量人工且工期较长，对正常行车安全易造成显著影响（图 1.2）。另一方面，机动车排放的废气、空气中的粉尘会附着在

隧道内壁瓷砖釉面，使其反光效果大大下降，严重影响着隧道的照明效果且增加了照明费用的支出。在隧道侧壁装饰材料的选取及规定中反射率要求不低于 0.7。而龙家湾、黄沙溪隧道侧壁采用 $20\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的浅黄色釉面砖，安装高度为 3.0 米。半年左右的时间，粉尘覆盖率可达 40% 左右。通过实测釉面瓷砖的反射率下降到 0.5~0.6 左右^[6]，实际测量数据显示，在正常反射率条件下，以瓷砖做装饰材料的隧道中，关闭 10% 左右的灯具后，隧道亮度仍能达到 $3.2\text{cd}/\text{m}^2$ 。在满足设计要求及行车安全的基础上，可以节省约 10% 的用电量^[7]。

目前，针对隧道侧壁的研究多集中于隧道材料的研发创新，而在原有基础上进行防护研究较少，尤其是特长隧道瓷砖釉面耐久性研究几乎没有。用于隧道瓷砖釉面防腐防污方面的技术尚不成熟，容易造成无效防护。因此，针对特长公路隧道的特点，开展瓷砖釉面耐久性劣化机理研究，开发出瓷砖釉面恢复的专用涂层，有助于改善隧道视觉环境，提高司乘人员的行车安全。

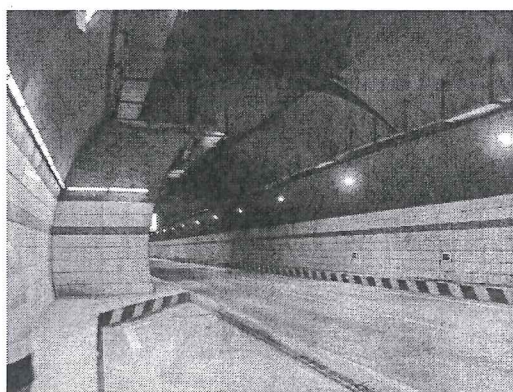


图 1.1 瓷砖污染现状

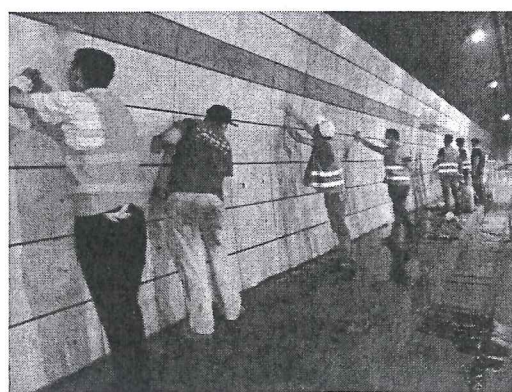


图 1.2 瓷砖清洗现场

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

2.1.1 公路隧道污染物及分布特征

(1) 隧道内污染物成分

近年来,国内外学者对隧道内的污染物作了大量研究,多数学者研究集中在挥发性有机物(VOCs)及悬浮颗粒物的研究。隧道中的VOCs主要由机动车尾气中的有机物挥发组成,这些VOCs主要是汽油和柴油不完全燃烧的产物。

2014年,Pang等人^[8]测试了瑞士隧道中轻型汽油车尾气的VOC,发现废气中C₂(乙烷)化合物、醛类和1,3-丁二烯的苯标准化排放率比在蒸发排放中要高得多,并指出故障车中乙炔有较高的排放比率。2016年,范武波等人^[9]研究了不同车型的VOCs排放,主要集中在甲苯及异构体和烷烃类化合物。2020年,Song等人^[10]在中国三条城市隧道中收集了大量VOC样本数据,探讨了GVs(汽油车)和液化天然气(LNG)燃料汽车的99种VOC的真实排放特征。GVs和LNG燃料汽车的VOC排放(v/v)分别富集乙烷和丙烷。丙烷、异丁烷和正丁烷是区分液化石油气燃料汽车和GVs的关键VOC示踪剂。2021年,Moreira等人^[11]对巴西里约热内卢隧道内8个工作日的特定挥发性有机化合物(VOC)浓度进行了两次监测,研究发现,通过隧道的车辆以轻型灵活燃料汽车(包括汽油和柴油)为主(99%)。最丰富的化合物依次为丙烷、异戊烷、正戊烷、丙烯和正丁烷。此外,单芳香族化合物是臭氧形成势(OFP)最高的VOC类别,而丙烯是臭氧形成

的主要 VOC 贡献者。2023 年, Niu 等人^[12]从宜昌市某隧道的单辆汽油、柴油汽车尾气以及加油站的汽油和柴油蒸发中获得 VOC 样本, 共同分析了 107 种 VOCs。

挥发性有机物 VOCs 中 NMHCs 组分比较复杂, 近年来也成为研究的重点。NMHCs 是指在环境空气中除甲烷以外的所有烃类化合物。2015 年, W.Ai-Helal 等人^[13]确定了 LDV 中 NMVOC 的顺-2-丁烯、甲苯的 NMVOCs 排放因子。PAHs(多环芳烃)属于总碳氢化合物(HC)的一种, 多环芳烃(PAHs)属于芳香烃及其衍生物的研究。王伯光等人^[14]研究表明空气中的多环芳烃(PAHs)以气(75%小分子量)、固(80%大分子量的五环)2 种形式存在。这些固体颗粒物 PAHs 极易吸附 SO₂、空气中的粉尘上。并指出汽车尾气中 PAHs 的排放特征应重点研究 PM₁₀ 中 PAHs 的含量与组成。Riccio 等人^[15]先后对 HC 中的氯化多环芳烃(Cl-PAHs)和多环芳烃进行了研究, 在隧道粉尘中分别检测到 14 种和 18 种 Cl-PAHs, 多环芳烃中苯并芘(一种肯定致癌的化合物)的浓度高达 69 纳克/立方米。Hao 等人^[16]对北京市 16 辆汽油轿车, 5 种排放标准和 2 种行驶工况下的多环芳烃(PAH)和硝基多环芳烃(NPAH)排放进行了测试, 采用高效液相色谱法(HPLC)分别在气相和颗粒相中测定了 16 种多环芳烃和 9 种 NPAHs。

隧道内对于 PM_{2.5} 组分的研究, Cui 等人^[17]测定了隧道排放的 PM_{2.5} 的化学成分, 并指出柴油车通行的道路 PM_{2.5} 组分的比例依次为 OC(27.7%)、EC(32.1%)(OC 有机碳和元素碳也称为黑炭)。Tuğçe 等人^[18]指出隧道颗粒物样品中以 OC1、EC3 和 EC4 组分为主, 道

路粉尘颗粒碳质部分中 OC4 和 EC2 组分占比最大（并非尾气中的碳组）。Zhu^[19]采用改进的热光学反射(TOR)法测量了隧道的 PM_{2.5} 碳组分浓度，隧道样品的 OC1 和 EC1 浓度最高，在隧道和城市环境中观察到大量的碳，这可能部分是由于与交通有关的轮胎磨损。Alves^[20]采用热光学系统测定了粒径分离颗粒(PM_{0.5}、PM_{0.5-1}、PM_{1-2.5} 和 PM_{2.5-10})中的有机碳和元素碳(OC 和 EC)，采用 ICP-MS 和 ICP-AES 分析了主要元素和微量元素。PM_{0.5} 占 PM₁₀ 质量的 56%，而 PM_{2.5-10} 仅占 12%。碳质部分集中在 PM_{0.5} 中，包含了 PM₁₀ 中 88% 的 EC 和 67% 的 OC。Boz-laker^[21]研究了隧道尾气（即排气管和非排气管）PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放的元素组成，包括 Rh、Pd 和 Pt 三种铂族元素。除此之外（非尾气无机元素成分），归属于非废气排放的要素可分为两类：Fe、Ba、Cu、Sb、Sn 和 Zn 在 1~2 μ m 的颗粒中含量较高；Ca、Al、K、Sr 和 Ti 主要存在于 2 μ m 颗粒中，与土壤再悬浮有关（PM_{2.5} 中含有多环芳烃）。

除此之外，Hou^[22]在本研究中，在中国南方沿海城市的一个隧道和一个城市站点收集气溶胶颗粒进行比较，根据来源，有四组颗粒：排气管排放的颗粒、磨损碎片、道路灰尘和二次颗粒。除此之外，汽车尾气还通过气相有机排放物氧化形成二次有机气溶胶(SOA)和氮氧化物氧化形成硝酸盐气溶胶形成“二次”PM。S 等人^[23]利用潜在气溶胶质量(PAM)流动反应器研究了公路隧道中车辆尾气中二次有机气溶胶(SOA)的形成，数据显示，汽车尾气对城市环境颗粒物浓度形成 SOA 的重要贡献。Yasmany^[24]在本研究中收集空气动力学直

径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) 的细颗粒物排放样本, 对 83 份样品进行了有机碳(OC)和元素碳(EC)分析。碳质组分(OC + EC)占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量的 28%~55%。经测定, SOAs 平均分别占总 OC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的 59-87%和 32-45%。Zhang^[25]指出乙二醛和甲基乙二醛是两种最小但含量最多的二羰基, 在形成环境空气中的二次有机气溶胶(SOA)中起着至关重要的作用。

Song^[26]通过对上海湘阴隧道气体污染物和颗粒物(PM)的采样, 发现隧道内主要颗粒为富铁颗粒、富钾颗粒、矿物颗粒、富钙颗粒和 Al-Si 颗粒。Zhang 等人^[27]指出车辆非废气排放占大气颗粒物污染的很大一部分, PM_{10} 排放主要为土壤和水泥粉尘的 51%-64%、排气管排放的 26%-40%、轮胎磨损的 7%-9%、制动磨损的 1%-3%; $\text{PM}_{2.5}$ 排放主要为排气管排放的 59%-80%、土壤和水泥粉尘的 11%-31%、轮胎磨损的 4%-10%、制动磨损的 1%-5%。Alves^[28]在葡萄牙北部布拉加的一条城市隧道的道路粉尘中对 PM_{10} 样品进行了以下分析, 总体而言, PM_{10} 中未检测到碳酸盐。OC 和 EC 分别占 PM_{10} 质量分数的 11%和 5%, 金属氧化物占沥青路面 PM_{10} 质量的 $29 \pm 7.5\%$, PM_{10} 含有数百种有机成分, 包括藿烷类、正烷烃和其他脂肪族、多环芳烃(PAH)、醇类、甾醇、各种类型的酸、甘油衍生物、内酯、糖和衍生物、酚类化合物和增塑剂。

(2) 隧道内污染物分布特征

近年来, 国内外针对隧道污染物分布作了大量研究, 并得出了一些有价值的成果。在现场测试方面, Fang 等人^[29]对南京市某公路

隧道出入口 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 样品中的多环芳烃(PAHs)进行了采集,发现高分子量多环芳烃的质量浓度从隧道入口到出口均明显增加。Liu^[30]在西安秦岭 1 号隧道中估算了 $PM_{2.5}$ 环境中多环芳烃的分布,隧道中部和出口的 PAH 总浓度分别为 22.78 和 52.80 kg/m^3 , 分别是隧道入口的 1.09 和 3.84 倍。Wei 等人^[31]使用移动车辆在公路隧道中现场监测 CO_2 和 CH_4 浓度的空间分布,分析总结了隧道内交通拥挤路段污染物浓度随深度不断加剧。宁艳涛^[32]等人对隧道内 $PM_{2.5}$ 、甲醛、TVOC、CO 浓度进行现场测试,发现甲醛、TVOC、CO 的浓度值随空气流动距离逐渐增大。刘国亮^[33]通过现场测试分析 CO 、 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、VOCs 横向和纵向分布特征。

在数值模拟方面,王一丁^[34]运用 FLUENT 论证横通道数量对隧道内车辆行驶时排放污染物浓度的影响。张双茁^[35]探索特长公路隧道互补式与竖井送排组合式通风系统的有害气体扩散路径。结果显示:上行出口污染物峰值呈“三峰”形分布,下行隧道则大约呈“几”字形分布。杨学成^[36]研究分析了公路隧道车流量顶峰时洞口和洞外有害气体的扩散。吕慧敏^[37]研究了隧道坡度和竖井高度对污染物扩散的相互影响。结果显示:污染物浓度与坡度和竖井高度呈现负相关;并指出交通阻塞时污染物浓度总量极具增大。陈爱娟^[38]基于 FLUENT 建立了射流风机和隧道三维模型,采用有限体积法研究了不同射流风机组合下隧道内通风情况;然后基于组分运输模型,以 CO 为模拟因子,分析了隧道内汽车尾气污染物排放和扩散规律。牟瑞芳^[39]指出隧道内风速和交通量与污染物扩散的相关性。结果显示:在正常工况下,隧

道内 CO 浓度沿 X 轴方向增加，但在距离通风井及洞口约 300m 处，浓度基本达到最大值。在横截面上，由于隧道壁对周围气流的阻碍，隧道侧壁附近的污染物浓度较大。

综上所述，国内外许多学者对隧道污染及分布问题进行了大量研究，取得了一定的进展。隧道内的污染物复杂多样，主要来源包含机动车本身排放和非直接排放。机动车本身排放的尾气包含了各种气体和颗粒悬浮物。有害气体如一氧化碳（CO）、二氧化碳（CO₂）、氮氧化物（NO_x）、二氧化硫（SO₂）、挥发性有机化合物(VOCs)及其 NMHCs（碳氢类化合物）。挥发性有机物气体 VOCs 多集中于烷烃、烯烃、炔烃、醛类及苯类。NMHCs 多集中于烷烃、烯烃、芳香烃及其衍生物多环芳烃。悬浮颗粒物的贡献者包含机动车尾气、道路粉尘、土壤水泥粉尘、轮胎磨损、制动磨损、沥青路面。其组分可以分为水溶性离子、无机元素、有机元素和含碳组分。水溶性离子包括 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Na⁺、Cl⁻、Mg²⁺、Ca²⁺；无机元素包括 Zn、Zr、Pb、Sn、Sb、Bi、Rh、Pd、Pt、Fe、Ba、Cu、Ca、Al、K、Sr 和 Ti；有机元素包括多环芳烃、硝基多环芳烃、有机酸及有机碱等；碳组分包括 OC 和 EC，柴油车的 EC 排放量大于汽油车，俗称黑炭，汽油车的 OC 排放量高于柴油车。

在现场测试方面，隧道内沿纵向污染物的分布特征几乎呈现相似的状态，即入口污染物浓度低，沿纵向浓度逐渐增加。隧道横断面上污染物多分布于隧道侧壁及拱顶。在污染物数值模拟方面，研究多集中于隧道洞口及不同通风方式下的污染物局部分布特征。在上述研究

中,不同的隧道通风方式下污染物分布均不同。隧道设置横向通道并开启时:在纵向污染物浓度不断增加,横通道内分布均匀;竖井送排式通风多呈“三峰”和“几”形,竖井周围污染物浓度高;在隧道横截面上,由于隧道壁对周围气流的阻碍,隧道侧壁附近的污染物浓度较大;洞口污染物近地面浓度高,纵向浓度随距离不断增大。

2.1.2 公路隧道侧壁瓷砖污染及损伤机制

隧道内是一个多酸的环境。唐国荣^[40]指出,隧道内漏水、水中 CO_2 过高、水中含有大量 H^+ 、水中浓度过高、水中含有各种镁盐(如 MgSO_4 、 MgCl_2)会对隧道衬砌混凝土形成水溶出性侵蚀、碳酸盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、一般酸性侵蚀和镁盐侵蚀四种侵蚀,导致衬砌混凝土结构变得松散,强度降低。石山^[41]研究得出: H_2S 气体主要来源于隧道污水中,并对衬砌有严重的侵蚀作用。宁远思^[42]指出,地下水、地表水丰富,泉眼、裂隙水发育,水质类型为 HSO_3^- 、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,具有酸性弱侵蚀性。金伟良^[43]指出,隧道运营中汽车尾气的主要成分有 CO_2 、 SO_x 和 NO_x 等酸性气体。刘恒^[44]阐述了汽车尾气中 SO_x 和 NO_x 酸性气体对混凝土的腐蚀机理,指出在隧道中酸性气体与潮湿的空气或衬砌表面的渗透水结合对衬砌形成腐蚀。胡红梅^[45]指出隧道衬砌遭受海洋环境介质的化学侵蚀破坏。其中 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 均为侵蚀源,二者相互作用,不仅导致硫酸盐侵蚀,还会引发镁侵蚀,进而构成极为严重的双重复合侵蚀。张忠^[46]对隧道内机动车排放的尾气中包含硫、氮氧化物研究指出:这些气体与隧道衬砌中的水分水合作用形成酸性溶液,在协同作用下对衬砌有侵蚀破

坏作用。尹蓉蓉^[47]研究了氯离子对衬砌混凝土中钢筋的锈蚀作用。翁其能^[48]指出机动车排放的尾气中酸性气体 (CO_2 、 SO_2) 与混凝土产生类碳化反应, 隧道内高湿热环境加剧碳化, 严重影响衬砌耐久性, 易造成混凝土开裂等现象。地下水中侵蚀离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} , 造成混凝土内钢筋锈蚀。李正士^[49]指出地下水中含有大量的酸根离子和氢离子, 氢离子作为酸溶液主要的贡献者, 会促使矿物水解或水解形成钙离子, 从而改变围岩的内部结构形成破坏。

罗强建^[51]机动车尾气中的粘稠油性物质易吸附在隧道侧墙, 并在潮湿及漏水的情况加剧粘附速度。这些粘稠物长期附着与侧墙, 严重影响侧墙装饰材料的功能性。李月姝^[52]对隧道侧壁污染物进行采集, 得出隧道内壁污染物及其分布状态主要包括三类: 粉尘类污染物、烃类油性污染物、霉菌类污染物。其中烃类污染物来自于机动车燃料的燃烧, 表现出较高的亲油性, 粉尘及霉菌类源于隧道自身环境表现为亲水性。戴胜等^[53]指出隧道内有机微生物(藻类青菌、硝化细菌、硫还原细菌及硫氧化细菌) 易栖息在衬砌表面, 对隧道衬砌混凝土造成不同程度的侵蚀损伤。

综上所述, 隧道侧壁处于复杂的酸性环境中, 主要包括地下水、地表水 (HSO_3^- 、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 具有酸性侵蚀性)、污水 (主要以 H_2S 气体为主)、海洋环境 (盐类) 和机动车排放的酸性气体 (NO_x 、 SO_x), 共同组成了隧道酸性环境。隧道侧壁污染物主要包括汽车排放废气中的粘稠油分 (烃类油性污染物)、粉尘类污染物、霉菌类污染物等。目前, 现有研究大部分集中于隧道衬砌酸性

损伤,而瓷砖因其极低的吸水率和较高的反射率广泛用于隧道衬砌表面的装饰。由于隧道内多酸、温湿度普遍较高的环境是否对隧道侧壁瓷砖釉面造成损伤,现有研究中还无法考证。

2.1.3 隧道内壁瓷砖釉面恢复

近年来,国内外学者对瓷砖釉面恢复的技术主要集中在调整釉料的配合比来增强耐久性。Moutinho S 等人^[54]研究了使用地质聚合物填充釉面瓷砖中的空隙的可能性,评估了地质聚合物(偏高岭土)在修复釉面瓷砖方面的潜力,包括填补缺口和粘结陶瓷碎片。通过多项测试,结果表明地质聚合物具有较好的陶瓷碎片粘结性能,可用于瓷砖外墙的保护和修复。Valeria^[55]为了提高瓷砖表面的抗菌性能,在烧制前验证了一种银基抗菌处理方法,该处理使用和不使用聚合物底漆。对烧制的瓷砖进行了抗菌活性测试、耐污性测试和接触角测量,结果表明所有功能化瓷砖都具有较强的抗菌活性,这主要与陶瓷表面的形态和结构参数以及聚合物底漆的存在有关。Teixeira^[56]研究了多种清洁方法,测试它们是否足以去除现代釉面艺术品中的钙水垢。测试方法包括机械(用沙子、氧化铝和桃子进行干式喷砂)和化学(HNO_3 、 Na_3EDTA 、Ionex H 和 Kalkrent®, 一种“环保”的商用洗涤剂)。结果表明,在测试的清洁产品中,玻璃相遭受到的影响最大, Ionex H 的危害较小。第一次现场测试表明,使用微喷砂减少水垢厚度的组合方法最有效,其次是选择的化学方法 Ionex H。Badr^[57]研究了玻璃陶瓷类型、树脂类型和表面光洁度对用于制造临时树脂粘结假体的 CAD-CAM 陶瓷的剪切粘结强度(SBS)的影响。通过接受光聚

合树脂水泥(Rely X Vener)和可流动复合树脂(Filet Supreme Ultimate Flow),使用通用试验机(Instron 4411)测定 SBS,结果显示流动复合树脂表现出比树脂水泥更高的 SBS。

另外,国内学者作了大量的研究。胡琨等人^[58]通过改良釉面材料配比,工艺并引入微晶玻璃,从而有效的提高了釉面的硬度。王培景^[59]利用正交试验法进行釉面配方优化实验。表明优化后的釉面比普通瓷砖釉面硬度明显提高,最高达 Hv720。张宏泉等人^[60]以现有陶瓷釉料为基础,加入少量粒径低于 10 μ m 的 α AlO 微粉和其他无机超微粉(硅灰石、白云石、滑石等),通过机械搅拌的方式得到所需的陶瓷釉浆。AlO 微粉中 Al 在陶瓷釉烧制过程中,可作为玻璃形成体,形成在玻璃网状结构中起到与 Si 相类似的作用;作为网络中间体,当网络结构中有断网时,Al 以[AlO]四面体联网将釉面的网状结构更紧密地连接在一起,从而使釉面的硬度得以提升。万红梅^[61]将树脂基料、分散胶液、乙烯基三甲氧基硅烷、聚四氟乙烯粉等混合得到复合树脂耐磨涂层胶液,将釉料、磨球和硅酸钠溶液等得到球磨釉浆,将成品砖用双层模具在其表面压制一层复合树脂耐磨涂层胶液,得到釉面砖。复合涂层表面的氢氧化铝细粉会氧化形成氧化铝,与有机树脂分子链互相缠结,使材料表面能提升,在摩擦过程中树脂生成的转移层较难剥落,磨损量减少。氢氧化铝提高釉面砖体与复合树脂涂层的界面结合力,提高釉面砖的硬度,还能使釉浆具有很好的悬浮性,增大釉的高温粘度,使釉面砖整体硬度和强度提高。黄春林^[62]发明了一种硬度高,平整度优越及抗菌功能的抗菌釉料。

国内外学者通过调整釉料配方、引入新型材料（如地质聚合物、银基抗菌剂、 α -Al₂O₃ 微粉等）以及改进工艺技术，显著提升了瓷砖釉面的耐久性、抗菌性能和硬度。其中，地质聚合物在修复釉面瓷砖方面表现出良好的粘结性能；银基抗菌处理显著增强了瓷砖的抗菌活性； α -Al₂O₃ 微粉和其他无机超微粉的加入有效提高了釉面硬度和结构稳定性。此外，复合树脂耐磨涂层和抗菌釉料的开发进一步拓展了瓷砖的功能性和应用范围。这些研究成果为瓷砖釉面性能的优化提供了重要的理论和技术支持。

2.1.4 现有研究不足

（1）在隧道污染物及分布方面，现有的研究多倾向于城市隧道及中短、长大隧道。秦岭终南山隧道全长 18.02 公里，属于特长隧道。隧道内交通量大、重型货车多，极大的长度增加了隧道的封闭性，使其机动车尾气不易扩散，容易导致行车排放的有害气体积聚。为了稀释隧道污染物浓度，终南山隧道采用的通风方式为通风井分段送排风加射流风机组合纵向式通风。机动车排放的尾气与空气不断混合，作为一种混合流体，在数值模拟中常被视作为一种雷诺数很大的湍流。由于隧道内设置多处通风井，增加了流体流动的复杂程度。因此，特长隧道内气体及污染物的分布需要进一步研究。

（2）目前，隧道侧壁瓷砖长期处于复杂环境中，随着运营年数增加，釉面易附着黑色污渍。机动车尾气中挥发性有机物（VOCs）多由燃料燃烧产生，其燃料燃烧生成的尾气中含有油性有机挥发气体和超细颗粒物。这些油性物质与有害气体、水蒸气、悬浮颗粒物（如

道路粉尘、土壤及水泥颗粒、轮胎与制动磨损颗粒物、非金属及金属颗粒，盐酸盐、硝酸盐颗粒等）通过吸附、混合，形成复杂油性污染物，长期黏附于瓷砖釉面导致隧道侧壁污染。此外，机动车排放的 NO_2 、 SO_2 等酸性气体与水蒸气混合形成酸性液体，人工清洗时清洗剂中含有的一定量酸类会侵蚀釉面砖，造成釉面损伤并降低强度。因此，开展隧道瓷砖釉面损伤机制研究，对釉面恢复具有重要意义。

（3）现阶段对瓷砖釉面砖的恢复主要集中在调整其烧制过程中的配合比，从而增加其釉面的硬度，降低釉面砖的损伤程度。隧道侧壁瓷砖釉面损伤后的恢复无相关研究，亟需根据隧道侧壁瓷砖功能及环境，开发出附着力强、粘污率低、易清洗、抗老化的涂层结构。

2.2 工作基础

（1）已完成相关的科研项目



图 2.1 获奖证书

课题组 2011 年开展了陕西省交通科技项目“公路桥梁钢结构与

混凝土专用防腐涂层的研究”（课题编号为 13-18），针对我国公路桥梁钢结构与混凝土结构存在的腐蚀问题，对不同环境下公路桥梁钢结构和混凝土的腐蚀规律及其防护对策进行研究，通过反复试验与测试，研制公路桥梁钢结构与混凝土专用防腐涂层。该项目获得了陕西省科学技术三等奖和陕西省公路学会一等奖。

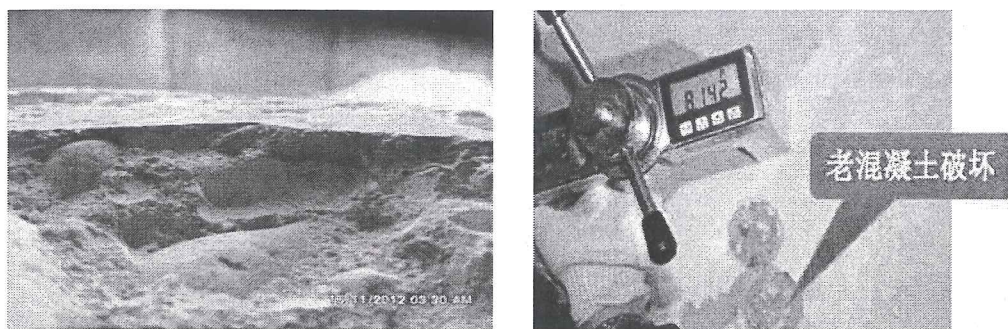


图 2.2 附着力试验

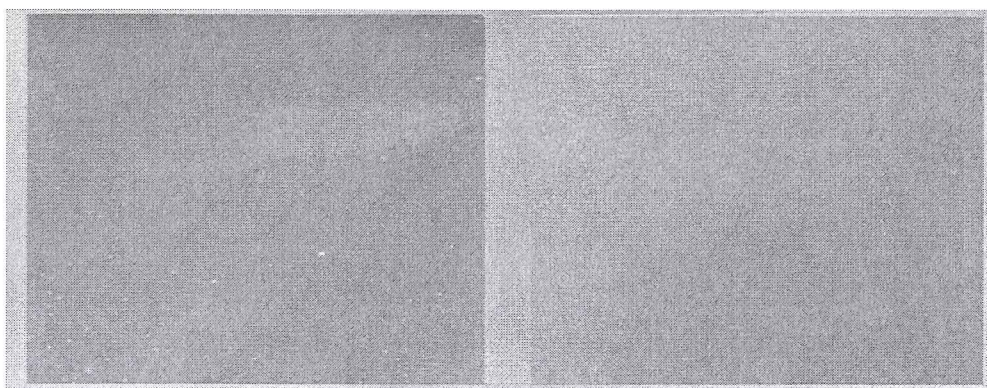


图 2.3 耐介质试验

课题组开发的涂层具备附着力大、抗老化性能优异、绿色环保等特点，为本项目材料研发打下了基础。

①附着力

涂层底漆可渗入不同基底内 1~5mm，固化后填充微孔，阻止外界腐蚀介质侵入，克服了传统涂料无法渗透微孔的缺陷与基底形成嵌入式结构，具有良好的附着力，受基底中水分影响较小，适用于潮湿

环境。

②耐介质试验

耐酸性浸泡试验：将面漆在 5% H_2SO_4 溶液中浸泡 480h 后，普通面漆漆膜起泡，公路结构防污面漆漆膜无异常，说明其优异的耐介质性能。

③老化试验

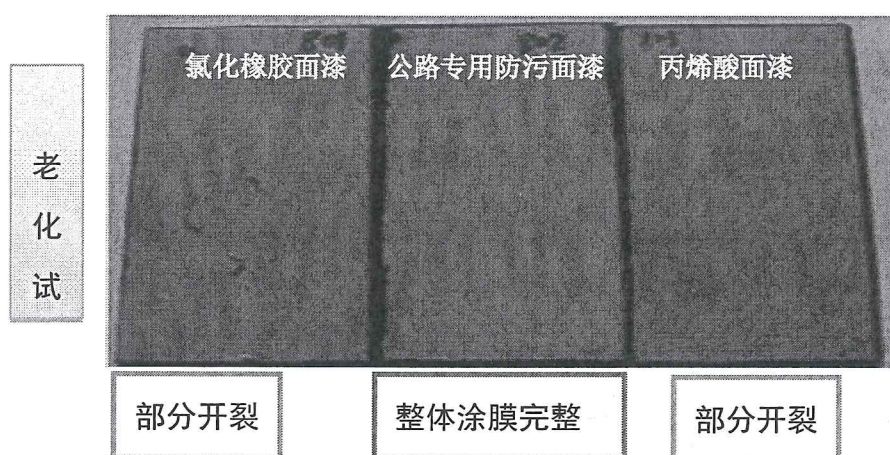


图 2.4 耐老化试验

通过进行耐老化试验，发现公路专用防污面漆已达到 2500h 不起泡、不开裂、不脱落。普通面漆仅能达到 1000h 左右。

④挥发性有机化合物

研发的涂层具有高固体分特性，大幅减少 VOC 排放。底漆固体含量最高可达 100%，即 VOC 排放最低为 0；面漆在满足抗老化性能的前提下，固体含量可达 80%以上，有效降低对环境的污染，实现安全、绿色、环保，切合绿色发展理念。

表 2.1 公路专用涂料与传统涂料的比较

涂料品种	典型可挥发的有机物含量 VOC(g/L)	备注
普通溶剂型环氧漆	400~700	密闭环境需通风施工，

高固份环氧漆	150~400	对人体均有不同程度的毒害影响,且污染环境。
聚氨酯漆	300~700	
醇酸树脂漆	350~700	
公路专用底漆、中间漆	最低为 0	VOC 排放量为 0 或很低, 对环境及施工人员影响很小
公路专用重防腐面漆	50~300	

(2) 目前正在开展的工作

目前,课题组结合隧道瓷砖釉面恢复应用场景,针对涂层开展抗污性能、耐火性开展试验测试工作。90 天涂层抗污性能测试结果表明,课题组开发的涂层漆膜表面极为清洁,污染物残留率为 5.1%,而普通涂料表面污染物残留率为 23.5%。

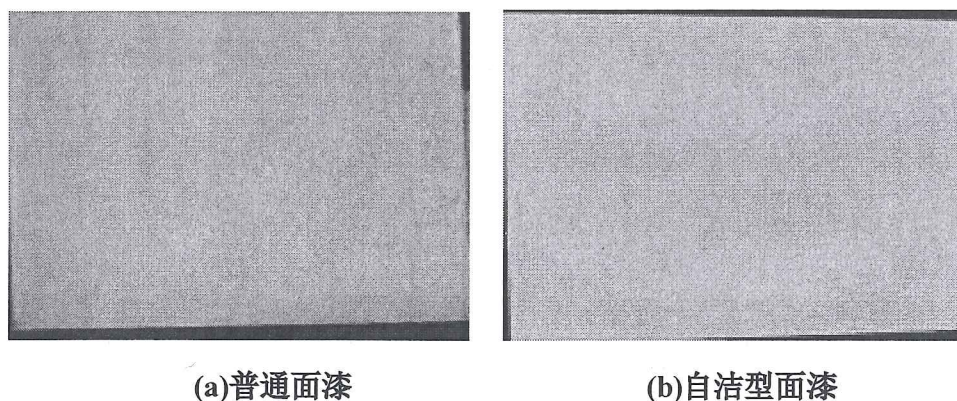


图 2.5 自洁型面漆隧道内 1 年试验

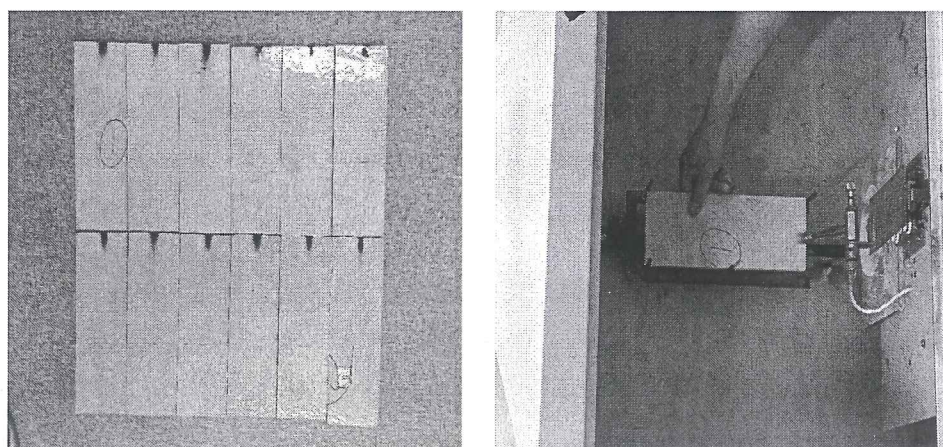


图 2.6 自洁型涂层耐火性试验

2.3 开展试验所具备的技术条件

(1) 长安大学具备多功能气候环境实验室, 该实验室可以在一定大小的空间内通过技术手段近似模拟大气环境条件, 从而达到实验目的, 尽可能使实验结果接近实际情况。该实验室分为集成实验室与环境实验室两部分, 可研究的实验内容为: 冻融循环实验、碳化实验、淋雨实验、盐雾侵蚀实验、高温高湿实验、SO₂ 等酸性气体腐蚀实验、紫外光照射加速老化实验、浪涌及浸泡实验等。上述实验内容可单独进行, 也可就研究内容进行交替发生或者同时发生的实验。如: 高温高湿及碳化实验、冻融-碳化交替实验、碳化-氯盐侵蚀交替实验。环境模拟实验室除房间尺寸较小外, 其余与集成实验室相同。两个实验室中间有一道密封性良好的门, 两者可以单独实验, 也可共同进行同一项实验, 较为灵活。在集成实验室里设置了一台量程为 30T 的反力架, 可用于施加纵向荷载。两个实验室通过同一个控制台控制, 控制台操作简单, 易于记录数据, 操作系统可智能化对实验内容实时监控。

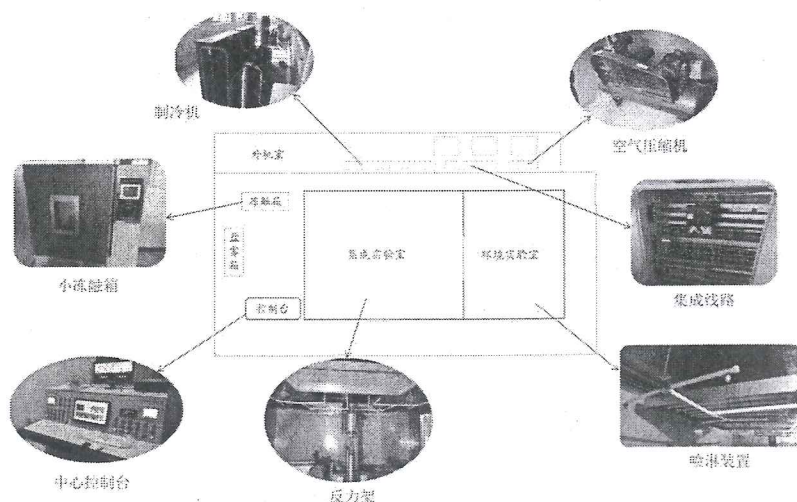


图 2.8 环境实验室示意图

(2) 道路施工技术与装备教育部重点实验室(长安大学)是经

教育部批准，于 2004 年 6 月开始建设运行。实验室在施工机械牵引动力学、高速公路机械化施工与养护技术、工程机械机电液一体化技术、工程机械疲劳寿命与可靠性、道路施工机械新材料开发等应用基础研究方面处于国内领先水平，为我国筑路机械、商用车辆与公路交通事业的高速发展和技术进步做出了重要贡献，已成为公路交通行业和工程机械领域进行科学研究、人才培养、学术交流和社会服务的重要基地。

2.4 参考文献

- [1] 2023 年交通运输行业发展统计公报[J]. 中国水运, 2024, (15): 31-35.
- [2] 李宝成. 隧道混凝土多因素定向腐蚀效应与性能退化规律研究[D]. 江苏科技大学, 2017.
- [3] 高斌, 何杰, 薛陶, 等. 运营期隧道病害段综合检测及处治对策研究[J]. 路基工程, 2018, (05): 221-226.
- [4] 杨骏. 深圳地铁一期工程地下防腐措施及提高耐久性对策[J]. 中国建筑防水, 2006, (03): 19-22.
- [5] 程鹏, 杨克栋, 康辰. 浅谈隧道内壁装饰[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013, 9(02): 108-111.
- [6] 罗建强. 蓄能发光反光材料在隧道节能照明中的应用研究[D]. 重庆交通大学, 2021.
- [7] 黄冠群, 曾文斌. 高速公路隧道内壁装饰材料选择与隧道节能的探讨[J]. 广东公路交通, 2012(03): 57-59.

- [8] Pang Y, Fuentes M, Rieger P. Trends in the emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) from light-duty gasoline vehicles tested on chassis dynamometers in Southern California[J]. Atmospheric Environment, 2014, 83:127-135.
- [9] 范武波, 陈军辉, 钱骏,等. 机动车尾气对人体健康的危害[J]. 中国环境管理, 2016(1): 110-113.
- [10] Song C, Liu Y, Sun L, et al. Emissions of volatile organic compounds (VOCs) from gasoline- and liquified natural gas (LNG)-fueled vehicles in tunnel studies[J]. Atmospheric Environment, 2020, 234(pre-publish):
- [11] Moreira Santos E, Almeida Azevedo D D. Impact on ground-level ozone formation by emission characterization of volatile organic compounds from a flex-fuel light-duty vehicle fleet in a traffic tunnel in Rio de Janeiro, Brazil[J] Air Quality, Atmosphere & Health (2021) 14:259–270.
- [12] Niu Z Z, Kong S F, Huang Z, et al. Differences in compositions and effects of VOCs from vehicle emission detected using various methods. [J]. Environmental pollution (Barking, Essex: 1987), 2023, 333:122077-122077.
- [13] Ait-Helal W, Beeldens A. et al. road measurements of NMVOCs and NO_x: Determination of light duty vehicles emission factors from tunnel studies in Brussels city center[J] Atmospheric Environment

122 (2015) 799-807

- [14]王伯光, 吕万明, 周炎,等. 城市隧道汽车尾气中多环芳烃排放特征的研究[J]. 中国环境科学, 2007, (04): 482-487.
- [15]Ricchio , E. Chianese et al. Real-world automotive particulate matter and PAH emission factors and profile concentrations: Results from an urban tunnel experiment in Naples, Italy[J] Atmospheric Environment 141 (2016) 379-387.
- [16]Hao X, Zhang X, Cao X, et al. Characterization and carcinogenic risk assessment of polycyclic aromatic and nitro-polycyclic aromatic hydrocarbons in exhaust emission from gasoline passenger cars using on-road measurements in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 645347-355.
- [17]Cui M, Chen Y, Tian C, et al. Chemical composition of PM 2.5 from two tunnels with different vehicular fleet characteristics[J]. Science of the Total Environment, 2016, 550123-132.
- [18]Tuğçe D, Serpil Y K et al. PAHs, elemental and organic carbons in a highway tunnel atmosphere and road dust: Discrimination of diesel and gasoline emissions[J]. Building and Environment 160 (2019) 106166.
- [19]Zhu C S, Cao J J, Tsai C J, et al. Comparison and implications of PM_{2.5} carbon fractions in different environments[J]. Science of the total environment, 2014, 466: 203-209.

- [20]Alves C A, Gomes J, Nunes T, et al. Size-segregated particulate matter and gaseous emissions from motor vehicles in a road tunnel[J]. Atmospheric Research, 2015, 153: 134-144.
- [21]Boz-laker A, Spada N J, Fraser M P, et al. Elemental characterization of PM_{2.5} and PM₁₀ emitted from light duty vehicles in the Washburn Tunnel of Houston, Texas: release of rhodium, palladium, and platinum[J]. Environmental science & technology, 2014, 48(1): 54-62.
- [22]Hou C, Shao L, Hu W, et al. Characteristics and aging of traffic-derived particles in a highway tunnel at a coastal city in southern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 619-620:1385-1393.
- [23]S D T, T A L, Shantanu J, et al. Secondary organic aerosol formation from in-use motor vehicle emissions using a potential aerosol mass reactor. [J]. Environmental science & technology, 2014, 48(19): 11235-42.
- [24]Yasmany M, Pierre H et al. Secondary organic aerosol contributions to PM_{2.5} in Monterrey, Mexico: Temporal and seasonal variation[J] Atmospheric Research 153 (2015) 348–359.
- [25]Zhang Y, Wang X, Wen S, et al. On-road vehicle emissions of glyoxal and methylglyoxal from tunnel tests in urban Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2016, 127:55-60.

- [26]Song L L, Walters, W W. et al. ^{15}N natural abundance of vehicular exhaust ammonia, quantified by active sampling techniques[J]. *Atmospheric Environment* 255 (2021) 118430.
- [27]Zhang J, Peng J, Song C, et al. Vehicular non-exhaust particulate emissions in Chinese megacities: Source profiles, real-world emission factors, and inventories[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266(P2): 115268-115268.
- [28]Alves C, Evtyugina M, Vicente A, et al. Chemical profiling of PM₁₀ from urban road dust[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 63441-51.
- [29]Fang X, Wu L, Zhang Q, et al. Characteristics, emissions and source identifications of particle polycyclic aromatic hydrocarbons from traffic emissions using tunnel measurement[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 67: 674-684.
- [30]Liu J, Deng S, Tong H, et al. Emission profiles, source identifications, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a road tunnel located in **'an, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(36): 85125-85138.
- [31]Wei C, Wang M. Spatial distribution of greenhouse gases (CO_2 and CH_4) on expressways in the megacity Shanghai, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 31143-31152.

- [32]宁艳涛, 贺肖杰. 青岛胶州湾海底公路隧道污染物浓度水平测试[J]. 建筑热能通风空调, 2020, 39(10): 72-75+71.
- [33]刘国亮, 秦丹, 刘陈鸿. 某高速公路隧道内空气污染物的浓度分布特征及其控制技术研究[J]. 企业科技与发展, 2023(02): 83-86.
- [34]王一丁. 横通道对公路隧道互补式通风的影响数值模拟及试验研究[D]. 兰州交通大学, 2017.
- [35]张双茁. 特长公路隧道互补与竖井送排组合通风污染物分布规律[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(09): 66-71.
- [36]杨学成, 高磊. 景区公路隧道洞口及洞外污染物分布数值模拟研究[J]. 价值工程, 2020, 39(07): 292-294.
- [37]吕慧敏. 单坡度隧道竖井自然通风条件下污染物扩散研究[D]. 中南大学. 2022.
- [38]陈爱娟, 方忠强, 赵延喜,等. 基于 FLUENT 的公路隧道通风优化配置及污染物分布模拟研究[J]. 江苏建筑, 2023, (05): 146-149.
- [39]牟瑞芳, 陈渤, 向杰. 复杂公路隧道空气污染物分布规律模拟研究[J]. 四川建筑, 2023, 43(05): 75-78.
- [40]唐国荣. 铁路隧道衬砌抗侵蚀的试验研究[J]. 铁道标准设计, 1996(05): 19-21.
- [41]石山, 于延寿. 污水隧道衬砌防腐蚀设计浅析[J]. 铁道标准设计, 2002(04): 39-40.
- [42]宁远思, 张庆欣. 铁山坪隧道衬砌防蚀施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2002(S1): 18-19+0.

- [43]金伟良, 赵羽西. 混凝土结构耐久性[M]. 上海: 科技出版社, 2002: 23-24.
- [44]刘恒. 大跨公路隧道结构耐久性技术研究[D]. 北京交通大学. 2007.
- [45]胡红梅, 马保国, 钱刚, 等. 海底隧道衬砌混凝土抗蚀影响因素分析与模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2007(03): 46-49+53.
- [46]张忠, 彭立敏, 张运良. “中性能混凝土”在提高隧道衬砌耐久性方面的初探[J]. 科技咨询导报, 2007, (27): 181-182.
- [47]尹蓉蓉, 朱合华. 受氯盐侵蚀浅埋公路隧道的安全性能[C]. 第二届全国环境岩土与土工合成材料技术研讨会论文集(一). 第二届全国环境岩土与土工合成材料技术研讨会论文集(一): 中国岩石力学与工程学会, 2008: 72-76.
- [48]翁其能, 张丽珺, 秦伟. 公路隧道环境因子对混凝土衬砌耐久性影响综述[J]. 材料导报, 2014, 28(15): 93-97.
- [49]李正士. 化学侵蚀条件下隧道衬砌混凝土和排水病害的防治措施[J]. 铁道建筑技术, 2012(07): 90-93.
- [50]王鸿宇, 田叶青. 特长公路隧道衬砌混凝土碳化试验研究[J]. 四川水泥, 2023, (03): 4-7.
- [51]罗建强. 蓄能发光反光材料在隧道节能照明中的应用研究[D]. 重庆交通大学. 2021.
- [52]李月姝, 史玲娜, 涂耘, 等. 基于隧道污染机制的内壁亮化耐污涂层技术试验研究与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S1):

553-559.

- [53]戴胜. 越江盾构隧道耐久性分析与评估体系研究[D]. 同济大学, 2008.
- [54] Moutinho S, Costa C, Andrejkovičová S, et al. Assessment of properties of metakaolin-based geopolymers applied in the conservation of tile facades[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 259.
- [55]Valeria T L, Elisa R, Giulia M, et al. Validation of Antibacterial Systems for Sustainable Ceramic Tiles[J]. *Coatings*, 2021,11(11):1409-1409.
- [56]Teixeira S, Vilarigues M, Lima A, et al. Testing the harmfulness of chemical cleaning methods for the removal of incrustations from a glazed stoneware public artwork[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2022, 55: 48-57.
- [57]Badr Z, Hamdan M, Han S, et al. Effect of surface finish and resin cement on the bond strength to CAD-CAM ceramics for interim resin-bonded prostheses[J]. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2024.
- [58]胡俊, 区卓琨. 提高陶瓷砖釉面硬度的途径[J]. *佛山陶瓷*, 2012, 22(02): 10-16.
- [59]王培景. 正交试验法在提高陶瓷釉面硬度实验中的应用[J]. *山东陶瓷*, 2013, 36(04): 22-23.

- [60]张宏泉, 李琦缘, 文进. "一种提高陶瓷釉面硬度的方法.", CN108314320A. 2018
- [61]万红梅. "一种釉面砖的制备方法.", CN110407569A. 2019.
- [62]黄春林, 仝松贞, 徐雪英, 等. 一种抗菌釉料, 具有高硬度, 平整釉面及抗菌功能的陶瓷砖及其制备方法, CN202011503709.5
- [63]Liu M, Zhu C, Cui T, et al. An alternative algorithm of tunnel piston effect by replacing three-dimensional model with two-dimensional model[J]. Building and environment, 2018, 128: 55-67.
- [64]Sudharsan N M, Ajaykumar R, Murali K, et al. A comparative study of dynamic mesh updating methods used in the simulation of fluid-structure interaction problems with a nonlinear free surface[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C, Journal of mechanical engineering science, 2004, 218(3): 283-300.
- [65]张洋. 公路隧道智能通风照明控制系统研究与设计[D]. 西安工业大学. 2024.
- [66]陈小凡. 车辆行驶对公路隧道内流场与污染物扩散影响的模拟研究[D]. 合肥工业大学, 2021.
- [67]徐丽. 城市公路隧道洞口污染物扩散数值模拟[D]. 四川: 西南交通大学, 2007.
- [68]Huang R, Shen X, Wang B, et al. Migration characteristics of CO under forced ventilation after excavation roadway blasting: A case study in a plateau mine[J]. Journal of Cleaner

Production,2020,267(pre publish):

- [69]李柏威. 车辆行进中纵向通风分岔隧道流场变化及 CO 扩散规律研究[D]. 安徽建筑大学. 2024.
- [70]岳仁辉, 熊锦江, 黄从俊,等. 城市隧道交叉节点污染物扩散规律研究[J]. 公路, 2024, 69(10): 449-456.
- [71]师帅. 开元隧道机动车尾气污染物及火灾烟气扩散的数值模拟研究[D]. 山东大学动力工程及工程热物理, 2019.
- [72]邓木生. 公路隧道运营通风智能管控系统研究[D]. 长安大学. 2023.
- [73]汪平. 竖井通风公路隧道空气质量模式研究[D]. 长安大学. 2007.
- [74]何伟宏, 刘洋, 陈克军. 隧道内污渍现状分析与涂料选择对策[J]. 公路交通技术, 2004, (04): 97-102+113.
- [75]汪宏, 王联果. 道路建筑物表面污染机理分析及治理对策[J]. 公路交通技术, 2002(01): 68-70.
- [76]GB/T 3810 13-2016 陶瓷砖试验方法第 13 部分 耐化学腐蚀性的测定[S]. 中国标准出版社, 2019.
- [77]任永泰. 用于隧道墙面清洗的新一代洗墙车[J]. 建设机械技术与管理, 2009, 22(08): 101-104.
- [78]徐有军. 隧道清洗车工作装置的结构分析与避障研究[D]. 南京理工大学, 2013.
- [79]李宗. 隧道壁与声屏障综合清洗车工作装置动力学分析与机构优化设计[D]. 长安大学, 2018.

- [80]蒋雅君, 杜坤, 周睿,等. 隧道排水盲管结晶有机酸清洗剂溶解效果试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S2): 137-143.
- [81]彭忠婷, 钟雪莲, 阮代镡,等. 陶瓷釉料的研究现状及其展望[J]. 广州化工, 2019, 47(22): 14-16+29.
- [82]GB/T 9274-1988 《色漆和清漆耐液体介质的测定》[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [83]GB/T 1771-2007 《色漆和清漆耐中性盐雾性能的测定》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [84]GB/T 1766-2008 色漆和清漆涂层老化的评级方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [85]GB/T1740-2007 漆膜耐湿热测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [86]GB/T 1865-2009 色漆和清漆人工气候老化和人工辐射曝露滤过的氙弧辐射[S]. 北京, 中国标准出版社, 2009.
- [87]GB/T 16422.3-2022 塑料实验室光源暴露试验方法第 3 部分: 荧光紫外灯[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [88]GB/T 9754-2007 色漆漆膜的 20°、60°和 85°镜面光泽的测定[S]. 北京: 中国质检出版社, 2007.
- [89]戚平. 金属保护用水性醇酸涂料的研制[D]. 复旦大学. 2010.
- [90]王小强. 水性丙烯酸改性醇酸树脂涂料的合成和性能研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33(22): 37.
- [91]孙潇潇, 谢永新, 陈朝阳,等. 水性醇酸树脂的改性研究 最新进展

- [J]. 涂料工业, 2012, 42(10): 77-80.
- [92]Smith, J., Johnson, R., & Brown, A. Gas evolution mechanisms in alkyd coatings exposed to sulfuric acid environments [J]. Corrosion Science, 2010, 52(11), 3765–3768.
- [93]Pirvu, C, Demetrescu, I, Drob, P, et al. Electrochemical stability and surface analysis of a new alkyd paint with low content of volatile organic compounds[J]. Progress in Organic Coatings, 2010, 68(4), 274–282.
- [94]Uzoh, C.F., Nwabanne, J.T. Investigating the effect of catalyst type and concentration on the functional group conversion in castor seed oil alkyd resin production[J]. Advances in Chemical Engineering and Science, 2016, 6(2), 190–200.
- [95]GB/T 5210-2006 色漆和清漆 拉开法附着力试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [96]GB/T11186.1-1989 漆膜颜色的测量方法第一部分原理[S]. 中华人民共和国化学工业部, 1989.
- [97]GB/T11186.2 漆膜颜色的测量方法第二部颜色测量[S]. 中华人民共和国化学工业部, 1989.
- [98]GB/T11186.3 漆膜颜色的测定方法第三部分色差计算[S]. 中华人民共和国化学工业部, 1989.
- [99]蔡明凡, 汪文涛. 浅谈高校建筑设施后勤修缮服务[J]. 四川建筑, 2022, 42(06): 297-298+301.

- [100] 管洲, 潘秀伟, 郑晗祯,等. 外墙乳胶漆配方设计中透水性能的提升策略[J]. 中国涂料, 2022, 37(11): 43-51.
- [101] GB/T 6750—2007, 色漆、清漆和塑料 不挥发物含量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [102] GB/T 1725—2007, 色漆、清漆和塑料 不挥发物含量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [103] JB/Z350-2000 高压无气喷涂典型工艺[S]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [104] GB 1764-79(1989) 漆膜厚度测定法[S]. 北京: 国家标准总局, 1989.
- [105] GB/T 5210-2006 色漆和清漆拉开法附着力试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [106] GB/T 3186-2006 涂料产品的取样[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [107] JTGF80/1-2017 公路工程质量检验评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社出版, 2017.

三、 实施方案

3.1 拟解决的关键问题

本项目拟着重研究解决以下关键问题：

(1) 根据气体分布特征，确定隧道瓷砖釉面劣化的主要影响因素，通过试验及理论分析，得出特长公路隧道瓷砖釉面劣化机理及劣化规律。

特长隧道内交通量大、重型货车多，极大的长度增加了隧道的封闭性，使其机动车尾气不易扩散，容易导致行车排放的有害气体积聚。为了稀释隧道污染物浓度，多采用的通风方式为通风井分段送排风加射流风机组合纵向式通风。由于隧道内设置多处通风井，增加了流体流动的复杂程度，隧道内污染物成分复杂且分布不唯一。因此，本次研究拟采用现场详细调研与数值模拟相结合的方法，对隧道主要有害气体分布特征进行测试分析，并结合有机化合物分析技术（多联合质谱仪技术）对隧道污染物组分进行表征，从而有效地得出影响隧道瓷砖釉面劣化的因素。通过模拟揭示瓷砖釉面损伤机制，有针对性地对釉面的恢复开展治理。

(2) 考虑运营公路隧瓷砖釉面及隧道内污染严重等特点，开发出经济有效的公路隧道瓷砖防腐防污涂层体系，提高隧道内司乘的视觉效果，保证行车安全。

目前，隧道侧壁瓷砖长期处于复杂环境中，随着运营年数增加，釉面易附着黑色污渍。机动车尾气中挥发性有机物（VOCs）多由燃料燃烧产生，其燃料燃烧生成的尾气中含有油性有机挥发气体和超细

颗粒物。这些油性物质与有害气体、水蒸气、悬浮颗粒物（如道路粉尘、土壤及水泥颗粒、轮胎与制动磨损颗粒物、非金属及金属颗粒，盐酸盐、硝酸盐颗粒等）通过吸附、混合，形成复杂油性污染物，长期黏附于瓷砖釉面导致隧道侧壁污染。此外，机动车排放的 NO_2 、 SO_2 等酸性气体与水蒸气混合形成酸性液体，人工清洗时清洗剂中含有的定量酸类会侵蚀釉面砖，造成釉面损伤并降低强度。

因此，针对隧道侧壁瓷砖釉面损伤及污染状况，研发的自洁涂层需具备附着力强、粘污率低、易清洗、抗老化等多重优势，解决隧道侧壁瓷砖釉面遭受侵蚀及污染后不易清洗的难题。

3.2 主要研究内容及实施方案

3.2.1 研究内容

（1）特长公路隧道瓷砖釉面污染物组份及分布规律

选取秦岭终南山隧道（全长约 18.02 公里）作为典型研究对象，采用多点位实时采样的方法，对隧道内 CO 、 NO_x 等气体成分的梯度测试工作，分析特长隧道内主要有害气体浓度的分布特征，测试隧道侧壁瓷砖表面污染物成分，为隧道环境治理与维护提供了数据依据。

（2）特长公路隧道内壁瓷砖釉面污染损伤机制

为揭示隧道侧壁瓷砖釉面在酸性环境下的损伤机制，通过室内模拟试验揭示硫酸侵蚀及酸性清洗剂-机械刷洗耦合作用对隧道瓷砖釉面的损伤机制。采用 $\text{pH}=1-2$ 硫酸溶液进行 7-21 天加速侵蚀，结合氢氟酸/草酸/盐酸清洗剂与机械刷洗循环实验，分析釉面微观形貌、损

伤率、成分迁移及光泽度演变。

（3）隧道内壁瓷砖釉面恢复涂层的基本性能研究

本课题旨在通过基础性能试验评估涂层材料特性，确保其在隧道环境中实现长效防护，从而延长瓷砖釉面服役寿命。实验选取外墙防水乳胶漆（建筑常规防护材料）、醇酸树脂涂料（传统防护体系）及防污自洁型涂料三类典型涂层进行对比，通过耐化学腐蚀性、湿热性、耐候性等指标测试，分析不同防污自洁型体系的性能及对瓷砖釉面的防护机理。

（4）隧道侧壁瓷砖釉面恢复施工工艺及质量检测

针对隧道侧壁瓷砖损伤后釉面采用防污自洁涂料进行修复，旨在有效提高瓷砖釉面光洁度，改善后期养护清洁难的现状。施工中经反复总结探索、深入研究，最终提炼形成隧道瓷砖釉面恢复的施工工法，为隧道长效维护与景观优化提供技术支撑。

3.2.2 实施方案

3.2.2.1 现场测试研究方案

现场测试聚焦隧道内主要有害气体浓度检测和侧壁釉面污渍样品采集两大目标，明确测试对象、点位、方法和仪器，实现对污染物分布及污渍样本的精准获取。

（一）测试对象与研究区域

研究区域：秦岭终南山特长公路隧道上行线，该隧道为双洞单向公路隧道，单洞长 18.02 公里，每隔 750 米设 1 处紧急停车带，共 24 个；

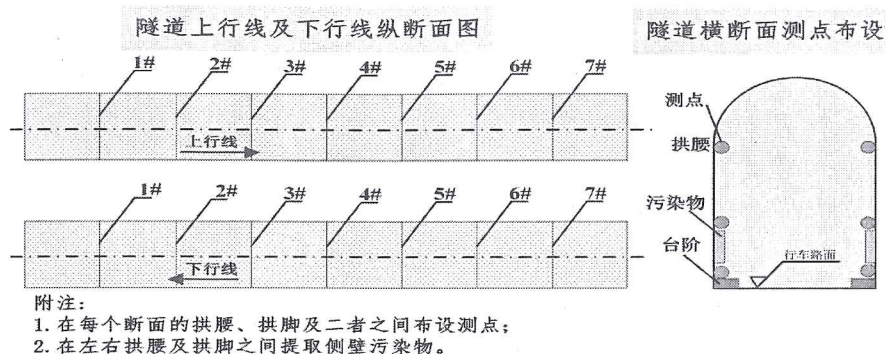


图 3.1 测点布设平面

测试对象：导致瓷砖釉面损伤和污染的有害气体（ CO_2 、 CO 、 NO 、 NO_2 、 SO_2 ）；隧道侧壁瓷砖釉面的灰黑色粉末状沉积物与黑色油斑复合污渍。

（二）测点布设

气体与污渍测点：选取上行线 1 号、14 号、24 号紧急停车带为核心测取点，覆盖隧道纵向不同区段；

垂直高度测点：每个测取点从台阶高度起，每隔 1 米设置 1 个高度，共设 4 个高度，覆盖隧道侧壁釉面砖主要分布区域；

测试频次：每个高度处连续测量 3 分钟，每 10 秒记录 1 次气体浓度数据，保证数据的连续性和代表性。

（三）测试仪器与材料

气体检测仪器：MS600 便携式六合一气体检测仪（仅开启 CO_2 、 CO 、 NO 、 NO_2 、 SO_2 检测通道，单位为体积分数 ppm），可实现多气体同步、实时监测；

样品采集与辅助材料：米尺、梯子、铲刀、分装袋、标签纸、标号笔及现场记录表格，用于污渍铲取、分类分装、标记及测试信息记录。

（四）现场测试内容与步骤

气体浓度测试：在预设测点和高度处，全程开启气体检测仪，记录不同位置的测试起止时间，同步采集 CO_2 、 CO 、 NO 、 NO_2 、 SO_2 的浓度数据；

污渍样品采集：在每个气体测点对应的隧道侧壁位置，使用铲刀铲取釉面污渍，按测点、高度分类装入分装袋并做好标记，保证样品与气体测点的一一对应性；

数据与样品整理：现场及时整理气体检测原始数据和污渍样品，做好编号、记录，确保后续分析的溯源性。

（五）现场测试结果分析

气体污染物分布分析：从垂直高度和隧道纵向距离两个维度分析，①垂直维度：探究 CO_2 、 CO 、 NO 、 NO_2 、 SO_2 浓度随距地面 1-4 米高度的变化趋势；②纵向维度：分析 3 个测点（不同隧道纵向区段）的气体浓度差异，总结污染物随隧道入口到出口的纵向变化规律；

污渍样品预处理：将现场采集的污渍样品密封保存，送至实验室进行干燥、研磨等预处理，为后续组分解析做准备。

3.2.2.2 污渍样品实验室组分分析方案

采用多谱学联用技术对现场采集的污渍样品进行全方位组分解析，从无机元素、晶体结构、有机化合物等维度，明确污渍的化学组成、晶体结构及物质赋存形态，揭示污染形成的物质基础。

（一）分析仪器与检测手段

构建多维分析体系，组合使用多种精密仪器，实现无机与有机组

分、定性与定量分析的全覆盖：

有机官能团与晶体结构分析：傅里叶变换红外光谱（FTIR）、核磁共振波谱（NMR）、X 射线衍射（XRD）；

无机元素定量检测：X 射线荧光光谱（XRF）、电感耦合等离子体发射光谱（ICP-OES）；

挥发性/半挥发性有机物分析：顶空气相色谱-质谱联用（HS-GCMS）、超高效液相色谱-质谱联用（UPLC-MS）；

水溶性离子检测：离子色谱（IC）。

（二）组分分析内容

无机组分分析：通过 XRF、ICP-OES、IC 检测样品中金属元素（Fe、Al、Ca、Na 等）、半金属元素（Si）、非金属元素（Cl、P）及水溶性离子（ SO_4^{2-} 、 Cl^- 等）的含量；通过 XRD 分析样品的晶体构型，确定特征晶相（如石英、氯化钠、方解石等）；

有机组分分析：通过 NMR、FTIR 解析有机官能团结构，识别特征有机化合物（如二甲苯异构体）；通过 HS-GCMS、UPLC-MS 分离检测挥发性和半挥发性有机物，确定有机组分的种类及含量；

组分汇总与分类：根据检测结果，对污渍组分进行系统分类，明确各组分的质量占比，梳理隧道侧壁釉面污渍的核心构成。

3.2.2.3 数值模拟研究方案

以 CO 为核心模拟因子，采用 CFD 计算流体力学方法，利用 Ansys Fluent 2021 软件构建隧道数值模型，模拟隧道内污染物的扩散规律，验证并补充现场实测结果，揭示污染物在纵向、垂直、横向三

个维度的精细化分布特征。

（一）数值模拟基础设定

核心理论：基于质量守恒、动量守恒、能量守恒三大定律，构建流体流动控制方程（Navier-Stokes 方程）、湍流模型（ $k-\varepsilon$ 模型）、组分输运方程，形成封闭方程组；

基本假设：为简化计算，设定四大假设 —— 不可压缩流体假设、连续介质假设、稳态流动假设、能量守恒原则，保证模拟的合理性和工程实用性。

（二）模型边界条件设定

以隧道西安至安康方向（西线）为模拟对象，模拟交通阻塞下机动车尾气 CO 的扩散情况，结合隧道实际参数设定边界条件：

机动车模型：将客车、货车简化为六面体方块（客车 $4\text{m} \times 1.7\text{m} \times 1.5\text{m}$ ，货车 $5\text{m} \times 2.1\text{m} \times 2.1\text{m}$ ），每隔 30m 布置一辆客车 + 一辆货车，间距 6m；设定尾气温度 373K，客车 CO 排放率 0.0236kg/s 、货车 0.06kg/s ，明确二者尾气中 CO 质量分数；

通风设备模型：射流风机简化为圆柱体（直径 1.12m，长度 2.24m），距拱顶 2m 布置，每隔 50m 设一组（2 台），共 36 组 72 台，设定风机进出口风速；竖井送 / 排风口按设计参数设定风速（送风口 16m/s ，排风口 19m/s ）；

隧道边界：隧道入口风速 2.5m/s ，出口为压力出口（0Pa）；隧道壁面设为 “wall”，粗糙度 5mm；湍流扩散系数 $2.3\text{m}^2/\text{s}$ 。

（三）隧道模型构建与网格生成

几何模型：基于隧道实际参数（建筑限界净高 5m，内轮廓净宽 10.92m，纵向分为 4 个通风区段），利用 Ansys Space Claim 建立隧道三维简化几何模型，包含机动车、射流风机、竖井等核心构件；

网格生成：采用 Fluent meshing 生成四面体网格，对关键区域进行局部加密；通过正交质量、最大纵横比评价网格质量，保证网格最小正交质量 ≥ 0.2 ，最大纵横比 ≤ 10.6 ，满足数值模拟计算要求。

（四）模拟结果分析

提取隧道内 CO 在纵向、垂直、横向三个维度的浓度分布数据，结合云图、XY 曲线进行可视化分析，与现场实测结果对比验证：

纵向维度：分析隧道路面至拱顶 1-4 米高度处 CO 浓度随隧道纵向距离的变化趋势；

垂直维度：提取 750m、5250m、10500m、16500m、18000m 监测断面的 CO 数据，探究浓度随垂直高度的变化规律，统计拱腰以下区域 CO 占比；

横向维度：对比货车、客车所在车道的 CO 浓度差异，确定浓度最大值的横向分布位置；

实测与模拟对比：将数值模拟得到的 CO 分布规律与现场实测数据对比，验证模拟模型的准确性，同时利用模拟结果补充现场实测的精细化分布信息。

3.2.2.4 公路隧道内壁瓷砖釉面污染损伤机制研究方案

以特长公路隧道侧壁釉面砖的实际服役损伤问题为核心，针对隧道酸性环境腐蚀、酸性清洗剂 + 机械刷洗耦合损伤两大核心损伤类

型，采用室内模拟试验为主的研究方法，结合宏观评定、微观表征、定量分析、成分检测等手段，系统探究釉面损伤规律与内在机制，整体研究方案分为酸性溶液腐蚀下釉面损伤试验和清洁剂清洗及刷洗下釉面损伤试验两大部分，配套多维度测试分析方法，具体设计如下：

一、酸性溶液腐蚀下瓷砖釉面损伤试验

以终南山隧道现场酸性气体实测数据为依据，模拟隧道实际酸性环境及长期侵蚀效应，探究硫酸溶液浓度、腐蚀龄期对釉面的损伤规律，核心采用控制变量法，设置多梯度浓度与龄期，结合宏观、微观、定量、成分分析实现损伤特性的全面表征。

（一）试验依据

基于终南山隧道现场实测酸性气体浓度（ CO_2 、 CO 、 NO 、 NO_2 、 SO_2 ），通过亨利定律及化学反应解离计算，确定隧道实际酸性环境 pH 为 4.58~7.0（弱酸性）；

参照《GB/T 3810.13-2016 陶瓷砖试验方法第 13 部分：耐化学腐蚀性的测定》，结合长期侵蚀累积效应，选定 pH 1.0-4.0 的硫酸溶液作为试验介质，模拟强酸性侵蚀场景。

（二）试验材料

试验试样：随机取样的釉面砖，加工为 100mm×100mm×10mm 规格，每种试液设 3 块试样；

腐蚀介质：0.1mol/L、0.05mol/L、0.01mol/L 硫酸溶液（对应 pH 约 1、1.3、2）；

试验器具：耐酸碱高硼硅玻璃筒（ $\phi 55\text{mm} \times$ 高 100mm $\times$ 厚

5mm)、橡皮泥(密封材料)、甲醇(清洗溶剂)、棉纤维白布、HB 铅笔、40W 白色内面灯泡;

检测仪器: 德国 ZEISS 蔡司 EVO MA10 型扫描电子显微镜 (SEM)、EDS 能谱仪、ImageJ 图像处理软件。

(三) 试验设计与分组

试验分组: 设空白组(清水)和 3 个酸溶液实验组 (S1: 0.01M H_2SO_4 、S2: 0.05M H_2SO_4 、S3: 0.1M H_2SO_4);

腐蚀龄期: 所有组别均设置 0d、7d、14d、21d 四个腐蚀时间梯度;

试验环境: 恒温 ($30\pm 2^\circ\text{C}$) 条件下进行静态浸泡, 试液液面高度控制为 (20 ± 1) mm。

(四) 试验步骤

试样准备: 用甲醇清洗釉面砖表面, 去除杂质后干燥, 保证试样表面无污染物;

密封灌液: 将高硼硅玻璃筒通过橡皮泥密封于釉面中心, 从筒口注入对应试液至规定液面, 确保密封无渗漏;

恒温养护: 将试验装置置于 $30\pm 2^\circ\text{C}$ 环境中, 分别养护 7d、14d、21d, 到龄期后取出试样, 清理表面试液并干燥;

空白对照: 空白组以清水替代硫酸溶液, 其余操作与实验组完全一致。

(五) 测试与分析方法

宏观损伤评定: 采用标准分级法, 通过 HB 铅笔划刻釉面, 判

断划痕是否可擦除，依据结果将釉面损伤分为 GHA 级（无变化）、GHB 级（明显变化）、GHC 级（部分 / 全部损坏）；

微观结构分析：①用 6mm 金刚石玻璃开孔器在釉面中心制取圆柱体试样；②试样溅射镀金 150s 提高导电性，置于 SEM 样品室抽真空；③设置加速电压 5.0kV、束流 5.0 μ A，在 $\times 500 \sim \times 10000$ 倍率下观察釉面微观形貌，分析裂纹、坑槽、晶状结构的演变规律；

损伤定量分析：利用 ImageJ 软件的 Weka Trainable Segmentation 机器训练法，对 SEM 图像进行标定、特征分类、模型训练、去噪点处理，计算腐蚀坑槽面积占釉面总面积的比例，量化损伤程度；

矿物成分分析：通过 EDS 能谱仪与 SEM 同步联用，检测未腐蚀及腐蚀 21d 釉面的矿物元素种类、质量占比，对比分析元素组成及含量变化，重点关注核心元素 Si 的流失情况。

（六）有害气体浓度与釉面劣化指标的对应关系构建

将现场实测气体数据与污渍、釉面监测结果进行测点一一匹配，建立如下关联指标：

1.纵向关联 1 号、14 号、24 号测点：

- （1）气体平均浓度（NO₂、SO₂、CO、CO₂）
- （2）污渍取样量（mg/cm²）
- （3）釉面光泽度损失率（%）
- （4）釉面微观损伤面积率（%）

2.高度关联 1m、2m、3m、4m 高度

- （1）各高度气体垂直分布梯度

(2) 污渍厚度、覆盖度、颜色深浅

(3) 釉面失光率垂直变化

3. 时间累积关联 采用“浓度—时间乘积 CTL (Concentration-Time Loading)”表征长期腐蚀强度

(1) $CTL(NO_2) = C(NO_2) \times \text{服役年限}$

(2) $CTL(SO_2) = C(SO_2) \times \text{服役年限}$

用于反映酸性气体长期侵蚀对釉面的累积损伤贡献。

二、清洁剂清洗及刷洗下瓷砖表面的损伤试验

针对隧道实际维护中常用的酸性清洗剂和机械刷洗方式，模拟清洗剂浸泡与机械刷洗的耦合作用场景，以光泽度为核心评价指标，探究不同酸性清洗剂、作用时间、机械刷洗对釉面的损伤规律，明确各因素的协同损伤效应。

(一) 试验依据

结合隧道釉面污渍类型（水垢、泛碱、硅垢、油污），选定隧道维护常用的氢氟酸、草酸浓缩液、稀盐酸三种酸性清洗剂；

考虑隧道实际清洗方式，设置仅浸泡和浸泡+机械刷洗两种工况，模拟现场维护的实际操作场景。

(二) 试验材料

试验试样：随机选取无损釉面砖，规格 100mm×100mm×10mm，共 9 块；

清洗剂：氢氟酸（pH1.5~2.0）、草酸浓缩液（pH0.5~1.2）、稀盐酸（pH0.5~1.5）；

试验器具：甲醇（清洗溶剂）、纤维麻布、清洗刷、3NH 三恩
驰光泽度仪；

试验环境：温湿度控制为 25% 湿度、50% 温度。

（三）试验设计与工况

采用双因素变量设计，以清洗剂类型、作用方式为变量，设置 2
个试验工况，浸泡龄期均为 24~432h（每 24h 为一个检测周期）：

表 3.1 釉面损伤试验工况

工况	清洗剂类型	浸泡龄期	温湿度	机械刷洗
工况一	氢氟酸 / 草酸浓缩液 / 稀盐酸	24~432h	25%、50%	0 次（仅浸泡）
工况二	氢氟酸 / 草酸浓缩液 / 稀盐酸	24~432h	25%、50%	每次龄期结束后刷 洗 200 次

（四）试验步骤

试样准备：用甲醇喷洒釉面，纤维麻布擦拭干净后干燥，确保表
面无杂质；

初始检测：用光泽度仪测定所有试样釉面的初始光泽度 U_0 ，记
录原始数据；

浸泡与检测：将试样分别浸泡于三种清洗剂中，按 24h、
48h.....432h 龄期取出，工况一直接测定光泽度，工况二先刷洗 200
次再测定光泽度，每次检测后记录数据；

数据计算：根据实测光泽度数据，计算釉面失光率，量化光泽度
衰减程度。

（五）测试与分析方法

光泽度检测：采用 3NH 三恩驰光泽度仪，在相同测试位置、相同角度下测定釉面光泽度，保证数据的一致性和准确性；

失光率计算：通过公式计算不同龄期、不同工况下的釉面累计失光率，反映光泽度衰减规律；

宏观状态观察：记录釉面从初始光滑→腐蚀泛白→生成白色粉末→亚光（近似坯体）的状态变化过程；

规律分析：对比三种清洗剂的损伤强度，分析“仅浸泡”与“浸泡 + 刷洗”的损伤差异，探究光泽度衰减的阶段特征及机械刷洗的强化效应。

三、试验数据处理与分析原则

控制变量原则：单因素分析酸浓度、腐蚀龄期、清洗剂类型、刷洗作用对釉面损伤的独立影响，再分析多因素的协同效应；

定性+定量结合：微观形貌、宏观状态为定性分析，损伤面积占比、失光率、元素含量变化为定量分析，实现损伤规律的全面揭示；

空白对照原则：通过清水空白组与酸溶液实验组对比，排除环境因素对釉面性能的影响，明确酸性介质的腐蚀作用；

数据有效性原则：对光泽度检测等数据中的异常点进行剔除，保证试验数据的真实性和规律性。

3.2.2.5 涂层基本性能及瓷砖釉面修复研究方案

以提升特长公路隧道瓷砖釉面防护与修复效果为核心，选取外墙防水乳胶漆、醇酸树脂涂料、防污自洁型涂料三类涂层为研究对象，先通过涂层基础性能试验筛选出适配隧道复杂环境的优质涂层，再基

于优选涂层开展瓷砖釉面修复专项试验，探究其修复效果与作用机理。整体研究方案采用室内模拟试验为主，结合宏观观测、性能检测、定量分析的方法，分为涂层基础性能测试和釉面修复效果验证两大核心部分，具体设计如下：

一、涂层基础性能测试试验

针对隧道内酸碱侵蚀、高温高湿、盐雾、紫外线老化等复杂服役环境，参照国家相关标准，从耐介质性、耐湿热性、耐老化性三个维度开展涂层性能测试，对比三类涂层的环境适应性，为釉面修复筛选核心涂层材料。

（一）耐介质性试验

参照 GB/T 9274-1988（耐液体介质）、GB/T 1771-2007（耐中性盐雾），测试涂层耐酸、耐碱、耐盐雾性能，验证其抵抗隧道内酸碱离子、盐类侵蚀的能力。

1. 试验材料与设备

涂层：外墙防水乳胶漆、醇酸树脂涂料、防污自洁型涂料（配套高渗透环氧底漆 + 丙烯酸聚氨酯面漆，A/B 双组份 5:1 混合）；

基材：27 块 100mm×50mm×0.2~0.3mm 马口铁；

试剂与器具：5% 硫酸溶液、5% 氢氧化钠溶液、甲醇、纤维麻布、涂料细毛刷、切片蜡石、盐雾试验箱、浸泡箱。

2. 试验步骤

（1）基材清洁：甲醇擦拭马口铁表面，去除杂质后干燥；

（2）涂层涂刷：底漆分 2 道涂刷（间隔 0.5h），5h 后刷涂面

漆，置于 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、 $50\pm 5\%$ 湿度环境养护 2d，再 70°C 烘箱养护 7d；

(3) 介质浸泡/盐雾测试：①耐酸/碱：涂层面朝上浸入酸碱溶液，密封浸泡 240h；②耐盐雾：石蜡封闭基材未涂装面，放入盐雾试验箱测试 1000h；

(4) 结果评定：取出试件干燥后，观察漆膜是否起泡、剥落、粉化、开裂，依据涂层老化评定方法对起泡、开裂、剥落、粉化等级定量评级。

(二) 耐湿热性试验

参照 GB/T 1740（漆膜耐湿热测定法），模拟隧道封闭环境下的高温高湿特性，测试涂层结构完整性与稳定性。

1. 试验材料与设备

涂层：三类待测涂层；

基材：9 块 $150\text{mm}\times 70\text{mm}\times 1\text{mm}$ 喷砂钢板；

器具：甲醇、纤维麻布、涂料细毛刷、密封材料、湿热箱。

2. 试验步骤

(1) 涂层喷涂：喷砂钢板表面喷涂 2~3 遍涂层，间隔 24h，控制干膜总厚度 $80\pm 5\mu\text{m}$ ；

(2) 基材密封：密封试板边缘及背面， $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、 $50\pm 5\%$ 湿度环境养护 7d；

(3) 湿热测试：试板垂直悬挂于湿热箱 $(30\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、80%湿度)，测试 1000h，定期观察状态；

(4) 结果评定：取出试板冲洗干燥，观察是否起泡、生锈、变色、开裂，以三块试板中两块及以上无缺陷为合格标准，同时对生锈、起泡等级定量评级。

(三) 耐老化性试验

参照氙弧辐射人工气候老化、荧光紫外灯暴露相关标准，结合 GB/T 1743（漆膜光泽度测定），测试涂层抗紫外线老化能力，以光泽度变化量化老化程度。

1. 试验材料与设备

涂层：三类待测涂层；

基材：9 块 150mm×70mm×2mm 304 不锈钢板；

器具：砂纸、酒精、纤维麻布、涂料细毛刷、紫外光耐气候试验箱、3NH 三恩驰光泽度仪（60° 测量角度）。

2. 试验步骤

(1) 基材处理：砂纸打磨不锈钢板提升附着力，酒精擦拭清洁并干燥；

(2) 涂层涂刷：按配比涂刷涂层，室内常温养护 7d；

(3) 初始检测：用光泽度仪测定涂层初始光泽度（GU）；

(4) 老化测试：试板涂刷面朝向灯管放入试验箱，每周观测表面状态并记录光泽度，持续 800h；

(5) 结果评定：计算涂层失光率，对比试验前后表面是否变色、起泡、开裂，依据失光率划分失光等级。

二、瓷砖釉面修复效果验证试验

以防污自洁型涂料为核心修复材料(由基础性能试验优选得出),针对隧道受损釉面的附着力不足、微孔渗透差、易污染、难清洁等问题,开展附着力、渗透深度、耐污染性、易清洗性四项专项试验,验证其修复效果与实用性能,同时明确修复涂层的作用机理。

(一) 附着力试验

参照 GB/T 5210-2006 (拉开法附着力试验),测试修复涂层与瓷砖釉面的界面结合力,验证其抗剥离能力。

1. 试验材料及设备

修复材料: 防污自洁型涂料;

基材: 隧道受损釉面瓷砖;

器具: 甲醇、纤维麻布、涂料细毛刷、粘结钉子、砂纸、粘结胶、拉拔仪。

2. 试验步骤

(1) 釉面清洁: 甲醇擦拭釉面, 去除浮尘与污染物后干燥;

(2) 涂层涂刷: 均匀涂刷防污自洁型涂料, 避免厚薄不均;

(3) 粘结准备: 打磨粘结钉子粘贴处涂层, 均匀涂抹粘结胶, 粘贴于试件对角位置, 室内放置 24h 固化;

(4) 拉拔测试: 启动拉拔仪, 记录测试数值, 取三组平行试验的平均值为最终附着力值;

(5) 结果评定: 判断涂层破坏模式(界面破坏 / 基材内聚破坏 / 胶粘剂内聚破坏), 验证数据有效性, 对比 1.5MPa 的标准粘结强度要求。

（二）渗透深度试验

测试防污自洁型涂料配套高渗透环氧底漆在受损釉面的微孔渗透能力，验证其封闭釉面微裂缝、阻隔腐蚀介质的效果。

1. 试验材料与设备

修复材料：高渗透环氧底漆、防污自洁型面漆；

基材：隧道受损釉面瓷砖；

器具：湿布、烘箱、涂料细毛刷、放大镜、分度值 0.5mm 钢直尺。

2. 试验步骤

（1）釉面预处理：湿布清除受损釉面浮尘，70℃烘箱干燥 24h，冷却至常温；

（2）涂层涂刷：100mm×100mm 区域涂刷底漆 2 道（间隔 0.5~1h），5~6h 后涂刷面漆 1 道；(23±2)℃、50±5% 湿度养护 2d，再 70℃烘箱养护 7d；

（3）渗透检测：将试件立面剖开，在剖开面均匀选取 5 个测量点，用放大镜观察并通过钢直尺测量涂料渗透深度；

（4）结果评定：取 5 个测点的算术平均值为渗透深度，验证涂层是否形成嵌入式封闭结构。

（三）耐污染性试验

模拟隧道内醋、红茶等液态复合污染物，测试修复涂层的抗污染能力，以色差量化污染程度。

1. 试验材料与设备

涂层：防污自洁型涂料、外墙防水乳胶漆、醇酸树脂涂料（对比）；

基材：120mm×70mm×0.2~0.3mm 瓷砖；

模拟污染物：酿造香醋（符合 GB 18187-2000）、红茶水（2g 红茶 + 250mL 沸水）；

器具：甲醇、纤维麻布、PSC-20 便携式分光测色仪、滤纸、去离子水。

2. 试验步骤

（1）瓷砖预处理：甲醇擦拭釉面，清洁后自然干燥；

（2）涂层制备：瓷砖表面喷涂防污自洁型面漆 2 遍（间隔 24h），干膜厚度 40~60μm，（23±2）℃、50±5% 湿度养护 7d；

（3）污染测试：将吸附醋 / 红茶水的滤纸对称放置于试板中部，持续滴液保持滤纸湿润 1h，移除滤纸后用去离子水冲洗并吸干；

（4）色差检测：采用分光测色仪测定试验前后涂层的 CIE1976（L*、a*、b*）色坐标，通过 CIELAB 色差公式计算总色差 ΔE_{ab} ；

（5）结果评定：依据 ΔE_{ab} 划分变色等级（0 级：无变色， $\Delta E^* \leq 1.5$ ；5 级：严重变色， $\Delta E^* > 12.0$ ），对比三类涂层的耐污性能。

（四）易清洗性试验

模拟隧道内粉煤灰（粉尘）、灰土（扬尘）、煤油（烃类油性污染物）等固态 / 液态颗粒物污染，测试修复涂层的自清洁与易清洗能力，以光泽度变化、反射率变化量化清洗效果。

1. 试验材料与设备

涂层：三类待测涂层；

基材：9 块 100mm×50mm×10mm 瓷砖；

模拟污染物：粉煤灰、蒸馏水、煤油（粉煤灰：煤油 = 1:3）；

器具：甲醇、纤维麻布、涂料细毛刷、喷壶、软质毛刷、光泽度仪、分光测色仪。

2. 试验步骤

（1）涂层涂刷：甲醇清洁瓷砖釉面，涂刷三类涂层（多层涂层间隔 24h）， $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、 $50\pm 5\%$ 湿度养护 7d，测定初始光泽度与反射率；

（2）污染模拟：①粉尘污染：喷壶喷洒蒸馏水形成水膜，撒布粉煤灰（厚度 1~3mm）；②油性污染：毛刷均匀涂刷煤油，再撒布粉煤灰；

（3）污染养护：室温放置 7d，每 2d 观察涂层状态；

（4）清洗测试：用清水冲洗试板表面污染物，擦干后测定光泽度与反射率；

（5）结果评定：计算涂层失光率，测定 400~700nm 可见光波段的反射率变化，对比三类涂层清洗后的表面状态、光泽度恢复率、反射率下降率。

三、试验数据处理与分析原则

平行试验原则：所有性能测试与修复试验均设置三组及以上平行试样，取平均值为最终结果，保证数据的准确性与重复性；

定量+定性结合：定性观察涂层表面起泡、开裂、污染等宏观状态，定量计算等级、失光率、色差、附着力、渗透深度等指标，全面

评价性能与修复效果；

对照分析原则：以外墙防水乳胶漆、醇酸树脂涂料为对照，突出防污自洁型涂料的性能优势；以试验前初始状态为基准，量化试验后涂层的性能变化；

标准对标原则：所有试验方法、结果评定均严格参照国家现行标准，确保试验的规范性与结果的权威性；

机理分析原则：结合涂层微观结构、成分特性（如有机硅助剂、环氧底漆渗透特性），分析优质涂层的耐侵蚀、防污染、自清洁作用机理，为隧道釉面修复提供理论支撑。

3.2.2.6 瓷砖釉面恢复施工工艺及质量评定研究方案

以防污自洁涂料体系（高渗透环氧底漆+自洁型防污面漆）为核心材料，针对隧道内壁瓷砖釉面污染、损伤修复需求，通过工艺研发、现场施工验证、质量管控、案例分析及经济性评估的研究思路，形成标准化的釉面恢复施工工法，同时建立完善的质量评定体系与效益分析方法。研究方案围绕施工工艺制定、质量控制、工程案例验证、经济性对比四大核心部分展开，具体设计如下：

一、施工工艺制定研究

基于防污自洁涂料体系的材料特性（高渗透、低表面张力、强附着），结合隧道内壁施工环境特点，制定基面处理 - 喷涂准备 - 喷涂作业 - 缺陷处理的标准化施工工艺流程，明确各工序的操作要求、技术参数及施工要点，形成适配隧道釉面恢复的专用施工工法。

（一）基面处理工艺研究

针对隧道釉面存在的油污、粉尘、裂缝、接缝不平整、凹陷等问题，研究针对性的基面处理方法，明确处理标准，保证基面与涂层的有效结合。

1.污染物清理：研究铲刀、钢丝刷、砂纸等物理工具 + 碳酸钠溶液化学清洗的复合清理方法，配合低压 / 高压淡水冲洗，确定清理后的基面标准：无灰尘、泥土、油污，表面洁净；

2.缺陷修补：研究腻子修补瓷砖釉面缺陷 / 接缝、聚合物水泥砂浆抹平釉面凹陷的施工方法，确定修补后基面标准：平整、无明显凹凸，接缝密实；

3.基面检测：明确喷涂前基面核心指标要求，为后续喷涂作业提供基础保障。

（二）喷涂准备工作研究

围绕喷涂作业的前期准备环节，研究工艺验证、材料配比、设备选型、环境排查的关键要点，制定标准化准备流程，避免施工隐患，保证喷涂连续性。

1.预试验验证：研究 10 m²小面积预试验方法，明确养护 7d 后干膜厚度（显微镜式测厚仪）、粘结强度（随机 3 点测试， $\geq 1.5\text{MPa}$ ）的检测标准，若不达标则扩大至 20 m²重新验证；

2.材料配比控制：研究涂料与固化剂、稀释剂的配比原则，明确熟化期、混合使用期要求，确定单次掺配涂料量（至少满足 100 m²连续喷涂），保证施工连续性；

3.喷涂设备选型：研究防污自洁涂料雾化要求，确定喷枪枪嘴优

选型号（517、519），明确枪嘴参数与喷幅、流量的对应关系，适配隧道大面积喷涂需求；

4.施工环境排查：研究隧道内施工环境保障要求，明确照明、线路、明火 / 电火花等隐患排查标准，适配防污自洁涂料（油性、高挥发性）的施工安全需求。

（三）喷涂作业工艺研究

分高渗透底漆和防污自洁面漆两大环节，研究高压无气喷涂为主、辊涂 / 刷涂为辅的施工工艺，明确各环节的施工参数、操作要求、环境条件、漆膜控制标准，保证涂层均匀、致密、性能达标。

1.底漆喷涂工艺

（1）施工方式：研究高压无气喷涂 + 辊涂配合、边角刷涂补涂的施工方式，明确自上而下的喷涂顺序；

（2）技术参数：确定喷涂压力（ $\geq 15\text{MPa}$ ）、喷头与基面距离（50-70cm）、移动速度（1-2m/s）、喷涂方法（一枪压半枪）、底漆干膜厚度（ $\geq 40\mu\text{m}$ ）、重涂时间（ $\geq 8\text{h}$ ）；

（3）环境条件：明确瓷砖表面 pH（ < 10 ）、含水率（ $< 8\%$ ）、空气湿度（ $< 85\%$ ）、环境温度（ $> 5^\circ\text{C}$ ）的施工阈值；

（4）材料特性：验证底漆 1-5mm 的釉面渗透能力，及固化后增强固结层的形成效果。

2.面漆喷涂工艺

（1）施工前提：研究底层干燥要求，明确含水率（ $\leq 6\%$ ）、空气湿度（ $\leq 75\%$ ）、表面 pH（ < 10 ）的喷涂阈值；

(2) 技术参数: 确定喷涂压力 ($\geq 15\text{MPa}$)、喷头与基面距离 (50-70cm)、移动速度 (1.5-2.5m/s)、面漆干膜厚度 ($\geq 30\mu\text{m}$)、最小涂装间隔 ($\geq 16\text{h}$, 温湿度调整);

(3) 材料特性: 明确双组分面漆混合使用期 (20°C时 5h, 温度每升 10°C缩短使用期)。

3.漆膜厚度计算: 依据 GB1756 和 GB1729, 研究涂料比重、固体含量与干湿膜厚度的换算公式, 建立漆膜厚度定量控制方法。

(四) 施工缺陷处理研究

针对喷涂过程中易出现的流挂、漏喷、起泡、砂眼 / 针孔等缺陷, 研究实时监控、原因分析、现场处置、后期修复的方法, 制定缺陷处理标准流程, 保证涂装整体效果。

1.实时监控: 研究 45° 夹角观察漆面的监控方法, 通过反光 / 颜色判断漏喷 / 涂层过薄, 实现即时补喷;

2.针对性处置: 分别研究流挂(调整压力 / 距离、增加闪蒸时间)、起泡(保证底漆表干、控制温湿度、避免涂层过厚)、针孔(调配粘度、静置 8-15 分钟使用)的现场控制方法;

3.后期修复: 明确缺陷漆膜完全干燥后, 砂纸打磨再重新涂装的修复标准。

二、质量控制研究

依据国家相关标准, 结合隧道釉面恢复施工特点, 建立质量标准规范、核心检测指标、关键工序管控的三维质量控制体系, 实现施工全过程的质量管控, 保障涂层施工质量与使用性能。

（一）质量标准与技术规范对标

研究并明确施工及质量检测所依据的国家 / 行业标准，保证质量控制的规范性和权威性，核心对标标准包括：

- 1.《高压无气喷涂典型工艺》JB/Z350；
- 2.《漆膜厚度测定法》GB 1764-79 (1989)；
- 3.《涂层附着力测定法》GB/T 5210 (2006)；
- 4.《涂料产品的取样》GB/T 3186 (2006)；
- 5.《公路工程质量检验评定标准》JTGF80/1-2017（防水层项目）。

（二）核心质量检测指标体系建立

依据对标标准，结合防污自洁涂料体系性能要求，建立涵盖外观、物理性能、耐候 / 耐介质性能的核心质量检测指标体系，明确各指标的检测方法与合格标准（见表 5.1），包括：

- 1.外观：漆膜平整均匀，无流挂、漏喷、起泡、针孔等缺陷；
- 2.物理性能：密度、固体含量、附着力（划格法 ≥ 2 级）、表干 / 实干时间（25℃）；
- 3.耐候 / 耐介质性能：耐酸性（240h）、耐碱性（240h）、耐人工老化（800h）、耐湿热（1000h）、耐盐雾（1000h）。

（三）关键工序质量控制措施研究

针对施工全过程的关键工序，研究制定针对性的质量控制措施，明确各工序的质量控制点与验收标准，实现工序化质量管控：

- 1.基面处理：验收标准为清洁、平整、无缺陷，无污染物残留；
- 2.底漆喷涂：验收标准为喷涂均匀、漆膜完全覆盖釉面，干膜厚

度 $\geq 40\mu\text{m}$;

3.层间间隔: 验收标准为底层漆膜完全干燥(一般 $\geq 24\text{h}$), 满足面漆喷涂环境阈值;

4.面漆喷涂: 验收标准为漆膜均匀、无缺陷, 干膜厚度 $\geq 30\mu\text{m}$, 整体涂层厚度不低于设计值的 20%;

5.边缘保护: 研究贴胶带等边缘保护方法, 验收标准为无超喷, 涂装线型符合设计要求;

6.缺陷修复: 验收标准为缺陷在漆膜干燥前完成修复, 修复后与整体漆膜一致。

三、工程案例验证研究

以西康高速公路秦岭终南山公路隧道为工程案例, 选取 200 米试验段开展现场施工验证, 研究涂层设计、现场实施、涂装效果的实际应用情况, 验证施工工艺的可行性、质量控制体系的有效性 & 涂料体系的实际使用性能。

(一) 案例工程概况调研

调研工程背景: 隧道单幅长 18.02km, 交通量大, 釉面存在严重的尾气 / 粉尘污染、腐蚀问题, 明确试验段修复需求与施工条件(部分封闭交通、分段施工)。

(二) 涂层配套体系设计研究

结合隧道实际需求, 研究底漆+面漆的涂层配套体系设计, 明确涂料品种、涂刷道数、干膜厚度的多组搭配方案, 同时确定涂装颜色(乳白色 + 红色腰线, 与原瓷片协调), 并明确涂层核心性能参数

(表 5.3)。

(三) 现场施工实施研究

按照制定的标准化施工工艺,开展试验段现场施工,研究基面处理、涂料涂刷的实际操作要点,验证工艺在现场的适配性,同时明确现场施工参数(表 5.4):

1.基面处理:研究碳酸钠溶液浸渍除油性污渍、瓷砖翻新界面剂处理坑槽、腻子勾缝处理接缝的现场应用效果;

2.涂料涂刷:研究高压无气喷涂 + 辊涂 / 刷涂的现场配合施工方法,验证底漆 / 面漆的配比、施工压力、喷嘴口径等参数的实际适用性。

(四) 涂装效果及性能验证研究

通过长期(5年)监测试验段涂装效果,研究防污自洁涂料体系的实际使用性能,验证其防污、自洁、耐候、耐久特性:

1.外观效果:监测漆膜光泽、洁净度,验证无明显挂灰、污损的防污效果;

2.性能机理:研究有机硅特殊助剂(添加量 0.3%~0.5%)降低漆膜表面张力、提升自洁能力的作用机理;

3.耐久性:验证漆膜在 5 年运营期内无起泡、开裂、粉化、变色的耐久性能。

四、经济性对比分析研究

选取传统防火涂料施工工艺为对比对象,从施工效率、施工成本、后期养护成本三个维度,开展防污自洁涂料体系施工工艺的经济性对

比研究，量化分析其经济效益，验证该工艺在隧道釉面恢复工程中的实用性与性价比。

（一）施工效率对比

研究两种工艺的施工效率指标，对比单位时间施工面积（ m^2/h ）、固定面积（ 1000 m^2 ）施工工期（ d ），分析防污自洁涂料工艺的施工效率优势。

（二）成本构成对比

拆解两种工艺的成本构成，分别研究前期施工成本（材料单价、单位面积施工造价）、后期养护成本（清洗频次、单次清洗造价、长期（5 年）养护总造价），建立全生命周期成本对比模型。

（三）综合效益分析

结合施工效果、施工效率、全生命周期成本，综合分析防污自洁涂料施工工艺的效益，包括：

1.外观效益：提升隧道釉面光洁度、平整度，改善隧道景观与行车舒适性；

2.运维效益：降低后期清洁、维护的操作难度，减少人工 / 设备投入；

3.经济效益：量化计算长期（5 年）成本节约比例，验证其经济可行性；

4.工程品质：对比传统工艺清洗不彻底、外观效果差的问题，验证该工艺对隧道工程品质的提升作用。

3.3 技术路线

本课题技术路线如图 3.1 所示。

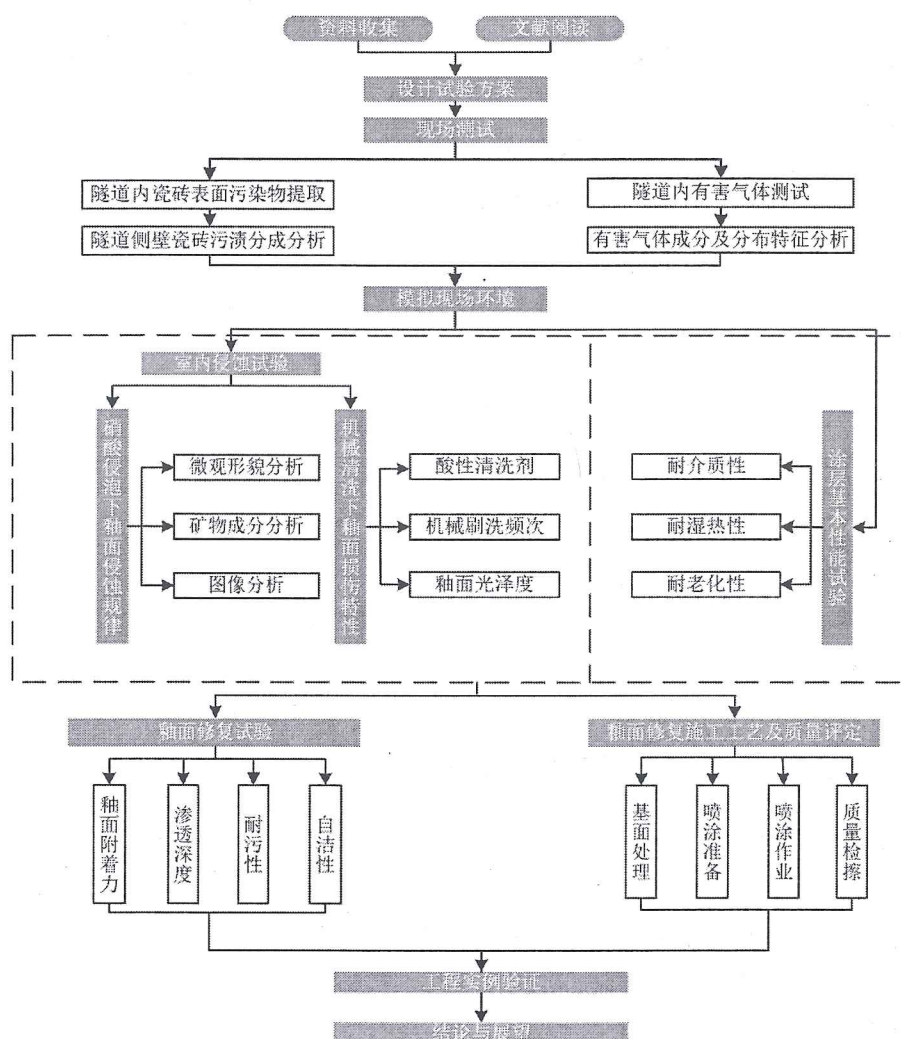


图 3.1 技术路线图

3.4 后续技术改造

依据本项研究成果，总结公路隧道自洁型涂层施工工艺，并依据室内外试验和数值模拟结果，为隧道侧壁瓷砖釉面恢复设计与施工提供指导，促进该项技术在在陕西地区的推广应用，促进隧道侧壁釉面恢复的产业化发展。通过示范工程对釉面自洁型涂层的应用，使得运营中的隧道侧壁向耐久、美观、维护成本节约、人力资源合理配置的

方向发展，并推动新型绿色产业链的形成，扩大社会就业范围。

3.5 有关技术经济指标

通过工程调查，了解公路隧道腐蚀污染现状及主要影响因素，通过室内外试验及理论分析，提出陕西地区隧道侧壁瓷砖防腐防污专用涂层体系，主要技术经济指标如下：

(1) 总结出特长公路隧道环境污染特征及现状，提出特长公路隧道瓷砖釉面劣化机理。

(2) 提出公路隧道侧壁瓷砖防腐防污涂层体系，开发出涂层结构不同部位相应功能的材料，涂层必须满足附着力强 ($\geq 2\sim 3\text{MPa}$)、耐老化性能好 ($\geq 2500\text{h}$)、绿色环保 ($\text{VOC} \leq 300$) 等要求。

(3) 结合底材特点及现场涂层结构实测参数，推荐出涂层施工工艺及质量验收标准，编制出公路隧道瓷砖釉面恢复设计与施工技术指南。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

本课题由长安大学主持，陕西省交通控股集团有限公司西镇公司、西安公路研究院有限公司等参与该项目的研究工作。

(1) 长安大学

长安大学直属国家教育部，是国家首批“211工程”重点建设大学、国家“985优势学科创新平台”建设高校、国家“双一流”建设高校。学校现有13个一级学科博士点，4个博士专业学位授权类别，34个一级学科硕士点，21个硕士专业学位授权类别。有9个博士后

科研流动站。

公路学院(公路科学研究院)是教育部直属的长安大学“211工程”重点建设的学院。学院科研实力雄厚,近五年来,先后获得国家、省部级科技奖励100余项,多项科研成果达到国际或国内领先水平,填补了诸多领域的空白。

学院现有公路桥梁与隧道陕西省重点实验室,实验室拥有一批国内一流水平的实验设施和检测系统,包括美国“MTS”公司的电液伺服闭合循环试验系统,英国“ELE”公司的自动马歇尔仪,丹麦“B·K”公司的测振试验系统,日本“三荣”、“共和”等公司的超级数据采集系统和信号处理系统等,为人才培养和科学研究提供了坚实的基础平台,同时也可为公路交通规划、勘测、设计、施工等部门提供优质高效的科技服务。

(2) 陕西省交通控股集团有限公司西镇公司

陕西省交通控股集团有限公司西镇分公司(简称西镇公司),是陕西交控集团旗下国有独资分公司,2021年6月正式成立,现有员工近600人,是陕南秦岭山区高速公路运营管理核心主体,兼具高速运维实战与科研实践基础,肩负区域高速保通保畅、服务民生出行,同时助力交通领域科研攻关与技术落地的双重职责。

公司主营西安至镇安高速公路全链条运营管理,管辖路段纵贯秦岭山区,串联关中、陕南两大区域,是区域关键交通干线,更是秦岭特长公路隧道运维、山区高速管控养护的重点实践载体。全线设7个兼具治超职能的收费站,核心承担秦岭终南山特长公路隧道南口安

检、日常管控重任；下辖 2 个服务区、3 个管理所、2 个监控中心，搭建起覆盖道路养护、隧道运维、交通监控、应急处置的全流程管理体系，具备完备的科研项目现场实施、数据采集、试点落地条件。

运营期间，公司立足秦岭山区高速及特长隧道运营痛点，深耕道路运维、安全管控、智慧交通等领域实操工作，构建“一路三方”协同应急体系，推行无人机智慧巡检、隧道隐患闭环管控、路况动态监测等实操举措，积累了丰富的特长隧道运维、山区高速污染治理、路况病害处置等一线实践经验；同步推进智慧交通建设、低碳绿色运营、交能融合等创新工作，为交通工程、隧道运维、环保治理等相关科研项目提供了优质的实践场景与真实数据支撑。

作为省属国企基层运营单元，西镇公司坚守国企担当，深耕高速运维主业，获评陕西省交通运输安全生产标准化建设标杆企业，始终坚持实战运营与科研创新相结合，积极对接各类交通领域科研项目，全力保障科研试点落地、数据采集分析、现场试验实施等工作，助力特长公路隧道运维、山区高速提质增效等科研成果转化，为区域交通高质量发展与交通科研创新赋能。

（3）西安公路研究院有限公司

西安公路研究院有限公司前身为 1985 年成立的陕西省交通科学研究所公路研究中心，2009 年改制为独立法人企业，2018 年更名为现用名，历经 30 余年发展，已从单一科研机构转型为集“产学研用”于一体的综合性交通科技企业，累计承担西北地区超 500 项公路工程技术服务项目。公司业务涵盖科研与技术研发、勘察设计与

咨询、工程检测与监测、智慧交通与信息化等领域，近五年主持省部级科研项目 42 项，形成 28 项核心技术，具备年完成 1000 公里公路勘察设计的产能，开发 7 套软件系统使养护效率提升 40%。其持有工程设计公路行业甲级等 18 项资质，是国家高新技术企业，累计获国家级优秀设计奖 12 项、省部级科技进步奖 56 项，8 项技术被列为行业推广技术。公司依托 5 大科研平台，累计获发明专利 47 项、主编国家及行业标准 13 部，科研成果转化率达 78%。现有员工 326 人，85% 为专业技术人员，含教授级高级职称 26 人、注册工程师 76 人，以及省级勘察设计大师 3 人等专家团队，组建 6 个专业创新团队，为行业提供强有力的技术支撑。

4.2 技术力量及人员构成

计划投入到本项目的主要研究人员预计有 15 人，其中，正高技术职称 2 人，副高技术职称 4 人，博士、硕士及其他技术人员若干。

项目组研究人员情况见表 4.1。

表 4.1 项目组主要研究人员名单

姓 名	单 位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
王苗苗	长安大学	女	1986-10-05	副高级	隧道工程	研究大纲及试验方案编制，组织涂层材料开发及室内外试验，编制研究报告及技术指南。
周志军	长安大学	男	1975-01-06	正高级	隧道工程	编制研究大纲，制定试验方案，负责项目进度及阶段成果审核，组织课题验收。
安 达	陕西交通控股集团有限公司西镇分公司	男	1974-10-06	中级	其他	参与研究大纲制定，协调现场测试及依托工程实施，参与课题验收。
石雄伟	西安公路研究院有限公司	男	1976-09-29	正高级	桥梁工程	参与研究大纲制定，指导室内外试验、依托工程施工及技术指南编制。

屈 波	陕西交通控股集团有限公司西镇分公司隧道管理中心	男	1976-09-27	副高级	隧道工程	参与试验方案制定，协调现场测试及依托工程实施。
苗建宝	西安公路研究院有限公司	男	1987-10-05	副高级	桥梁工程	参与涂层材料的开发及性能试验；指导依托工程涂层施工。
张 嶙	陕西交通控股集团有限公司西镇分公司	女	1985-08-19	副高级	隧道工程	协助现场测试及依托工程施工；参与编制涂层施工技术指南。
任钊铎	长安大学	男	2001-10-26	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试验及涂层性能试验，整理研究报告。
任展腾	长安大学	男	2000-05-04	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试验及涂层性能试验，整理研究报告。
李路	长安大学	男	2002-04-27	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试验及涂层性能试验，整理研究报告。
赵袁	长安大学	男	2002-02-27	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试验及涂层性能试验，整理研究报告。
陈伊喆	长安大学	女	2002-08-20	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试验及涂层性能试验，整理研究报告。
许慧	长安大学	女	2000-05-20	助理级	隧道工程	参与现场环境测试、瓷砖釉面损伤试验及涂层性能试验，整理研究报告。
朱林植	长安大学	女	1996-03-18	助理级	隧道工程	依托工程环境测试及污染物取样分析，隧道环境数值模拟。
许麦扎	长安大学	男	1996-01-04	助理级	隧道工程	现场气体分布测试及数据分析、涂层材料开发及性能测试。

4.3 承担的主要工作

(1) 长安大学负责课题研究大纲的制定及可行性报告编制工作，开展室涂层基本性质试验、瓷砖釉面损伤及恢复试验、釉面恢复现场施工及质量检测等方面的研究工作，整理研究成果，编制研究报告及技术指南，完成各个阶段项目评审工作。

(2) 陕西交通控股集团有限公司西镇公司协调落实依托工程，参与涂层材料开发及釉面损伤、恢复试验，指导依托工程瓷砖釉面恢复现场施工，审查课题研究成果，协助项目评审工作。

(3) 西安公路研究院有限公司参与研究方案的制定及技术交底工作，参与涂层材料开发及釉面损伤、恢复试验，编制依托工程瓷砖釉面恢复施工方案，指导现场瓷砖釉面恢复施工及质量控制，协助项目评审工作。

4.4 项目主要负责人情况

王苗苗，现就职于长安大学公路学院，副教授，硕士生导师。2005-2009 年就读于中国地质大学（北京）勘查技术与工程专业，获学士学位；2005-2009 年就读于中国地质大学（北京）地质工程专业，获硕士学位；2013-2016 年就读于中国科学院地质与地球物理研究所获博士学位。2016-2018 年在中国地质科学院地质力学研究所做博士后。2018 年入职长安大学，主要从事工程地质与岩体力学方向的教学与科研工作，在岩体破坏机理、灾害预测预报等方面开展了系列研究。先后主持了国家自然科学基金、陕西省科技厅项目、中国地质调查局重点实验室项目等 6 项课题，参与中科院重大专项等其他纵向课题 7 项。发表科研论文 30 余篇，其中第一作者或通讯作者 18 篇，国家发明专利 1 项，参编行业标准 1 部，获厅局级特等奖 1 项、一等奖 1 项、二等奖 1 项。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程概况

秦岭终南山公路隧道是世界最长的双洞高速公路隧道，单洞全长18.02公里，按双向车道高速公路标准建设。极大的长度增加了隧道的封闭性，容易导致行车排放的有害气体积聚，使得隧道内有害气体的浓度远远高于一般隧道。同时，汽车尾气携带的热量和水汽也不易排出隧道，使得隧道内的温湿度普遍较高，加快了有害气体对瓷砖釉面的侵蚀。

其次，隧道运营期汽车尾气排放的油污、环境中粉尘、碳氢化合物和氮氧化物等污染介质含量较高，因常规瓷砖防污染性能较弱，易引起隧道侧壁严重污染，反射率降低，影响路容路貌和通行环境。隧道日常维护中，瓷砖表面清洗难度大，频次高，增加了日常养护的费用和工作量。为最大限度的提升清洗效果，隧道清洗需添加酸碱等清洗剂进行处理，长期使用容易引起隧道侧壁瓷砖釉面的腐蚀破坏及周围环境的二次污染，影响其使用寿命。

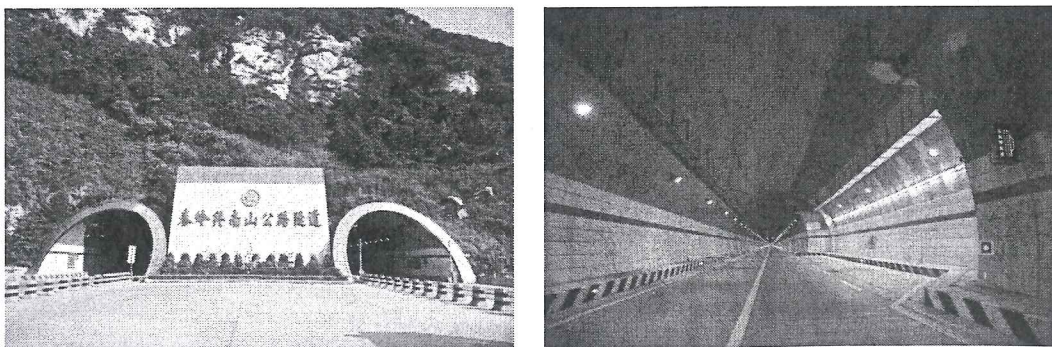


图 5.1 西康高速秦岭终南山隧道

5.2 投资来源

研究费用来源于交通运输厅拨款与企业自筹。工程进度与项目科研进度的配合，企业自筹经费主要用于依托工程釉面恢复。

(1) 第一阶段（6个月）

时间：2026年3月-2026年8月

对不同区域公路隧道进行现场调研，统计隧道侧壁瓷砖污染状况，分析污染物主要成份及产生的原因，确定涂层开发方向。

阶段目标：提交调研报告

(2) 第二阶段（6个月）

时间：2026年9月-2027年2月

根据隧道瓷砖底材特点，开发对应的涂层底漆、中间漆及面漆；对运营阶段隧道侧壁瓷砖釉面恢复进行施工，总结基底处理施工工艺；综合考虑底材、涂层等特性，推荐涂层结构及相应材料。

阶段目标：开发出适宜于隧道侧壁瓷砖防腐防污涂层材料，推荐出瓷砖釉面恢复适宜的涂层结构。

(3) 第三阶段（6个月）

时间：2027年3月-2027年8月

选取典型隧道进行瓷砖釉面涂层施工，通过试验确定基底处理及涂层喷涂工艺，制定涂层施工质量验收标准，编制隧道瓷砖釉面恢复设计与施工技术指南。

阶段目标：对典型隧道侧壁瓷砖进行涂层施工；编制出隧道瓷砖釉面恢复设计与施工技术指南。

(4) 第四阶段（6 个月）

时间：2027 年 9 月-2028 年 2 月

编制研究成果报告及其他有关文件，申请组织验收。

5.3 组织管理形式

为保证项目顺利实施，在项目组织管理方面制定以下措施：

- 1) 严格执行合同所规定的内容，保证项目按时、保质完成；
- 2) 提交项目进度和经费使用工作报告；
- 3) 提交鉴定验收所需技术文件和经费使用报告，做好鉴定验收的准备工作；
- 4) 负责项目应用所需人才的培训及成果推广应用，加速科技成果转化为现实生产力；
- 5) 加强项目实施过程中的检查，定期检查项目执行情况，确保项目质量；
- 6) 鼓励研究人员学术交流，支持研究人员出席国内外各种学术会议；
- 7) 加强对项目研究经费的管理，保证项目经费的合理使用；
- 8) 项目合同内容完成后，将工作总结、研究报告、技术总结及有关资料上报管理中心；
- 9) 注意知识产权的保护，实验记录、数据、图片、录像、报告等资料，按照技术档案管理办法整理归档，不得散失。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

经费投入估算		经费支出估算	
科 目	估算数 (万元)	科 目	金 额 (万元)
省交通运输厅补助	19.79	合 计	40
工程配套研究经费	20.21	(一) 直接费用	37
单位自筹		1.设备费	2
其他经费		(1) 购置设备费	1
		(2) 试制设备费	0
		(3) 设备改造与租赁费	1
		2.材料费	1
		3.测试化验实验加工费	2
		4.燃料动力费	2
		5.差旅费/会议费/国际合作与交流费	3.79
		6.出版/文献/信息传播/知识产权事务/印刷费	1
		7.劳务费	3
		8.专家咨询费	2
		9.其他支出（现场依托工程实施）	20.21
		(二) 间接费用	3
		1.管理费	2
		2.绩效支出	1

注：预算编制按照《陕西省人民政府关于改进加强省级财政科技计划和项目资金管理的实施意见》（陕政发[2017]22号）文件执行。

七、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

7.1 项目预期目标

(1) 通过工程调查及现场测试，明确公路隧道气体环境特征及污染现状。

(2) 根据室内瓷砖釉面试验结果提出隧道瓷砖釉面劣化机理及防护要求。

(3) 开发出适合隧道瓷砖釉面恢复的防护涂层，有效改善司乘的视觉效果，提高行车安全。

7.2 最终提交的研究成果及其形式

(1) 研究报告：在役公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究

(2) 技术指南：公路隧道瓷砖釉面恢复设计与施工技术指南

(3) 涂层体系：推荐出瓷砖釉面恢复涂层体系及相应结构层防护材料

(4) 实体工程：对依托工程隧道侧壁瓷砖进行釉面恢复，并进行长期跟踪观测，制定实体施工验收标准。

(5) 研究成果达到国内领先水平，在国内外核心学术期刊上发表论文 1-2 篇，申请专利 1 项。

7.3 经济、社会、环境效益分析

目前我国公路总里程已位居世界前列，随着我国经济的快速发展，随着设计标准的进一步提升，公路隧道还将迅速增加。公路隧道侧壁瓷砖釉面耐久性及隧道内行车安全是运营单位关注的重点。隧道

瓷砖有效涂装不仅提高了瓷砖釉面的耐久性，而且改善了隧道内行车环境，提高了行车安全。

依托工程秦岭终南山隧道侧壁施工期间采用了瓷砖进行装饰，经过长时间运营后，由于洞内酸性环境腐蚀作用，目前隧道侧壁瓷砖污染严重，视觉效果降低，存在一定的安全隐患，且清洗过程中，为保证清洗效果，需加入适量酸性液体，长期使用酸性液体容易引起瓷片和隧道混凝土的腐蚀破坏及周围环境的污染。

采用本课题研究成果，经济效益也非常显著。隧道运营期间，以瓷砖为底材，采用专用涂层对瓷砖釉面进行恢复后，清洗过程中，无需添加任何清洗剂，对原隧道结构无腐蚀且绿色环保。此外，以往隧道瓷砖清洗耗费大量人工且影响正常通行时间相对较长，对瓷砖釉面恢复后采用自动化专用设备清洗，效率高，影响通行时间短，社会效益显著。

表 7.1 运营期防污涂层经济效益分析

涂装类型	建安费（含人工） （元/平米）	单次涂装造价 （万元）	耐用年限 （年）	20 年清洗费用 （万元）	20 年费用合计 （万元）
防污涂装	63	222.43	10	257.14	785.94
瓷砖材料	/		20	1028.57	1028.57
20 年累计节省费用					242.63

综合考虑釉面恢复专用涂层的耐久性及清洗费用，瓷砖釉面恢复专用涂层具有显著的经济效益，以某长度为 3000 米隧道（双幅）为例，经济效益比较如表 1 所示，20 年共节约清洗费用 242.63 万元，表明运营期隧道侧壁瓷砖釉面防污涂装后经济效应显著。

八、 其它需要说明的问题

无

九、 申请单位意见

课题研究目标明确，研究方案可行，经费与依托工程已落实，具备研究基础与条件。同意申报，并提供必要支持，确保按时完成。



单位负责人：（签字）

科研项目专用章
年 月 日

运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理 及恢复技术研究

大纲评审意见

2026年3月18日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究”（项目编号：25-34K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容比较全面，研究目标明确，技术路线可行。

二、项目研究人员组成合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

三、预期成果覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1.补充隧道有害气体分布与瓷砖釉面劣化的关联分析，明确不同污染物对釉面劣化的影响权重；

2.细化技术经济指标，补充涂层使用寿命、单位面积造价、养护成本降低幅度等量化参数；

3.完善依托工程应用方案，补充涂层施工后的长期跟踪检测指标及评价标准。

主任委员： 牛虎

2026年3月18日

专家审查意见表

项目名称	运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究				
专家姓名	韦虎	职务/职称	正高级工程师	专 业	隧道与地下工程
专家单位	陕西省交通规划设计研究院有限公司			联系电话	13909260723
评 审 意 见 该项目大纲紧扣特长公路隧道瓷砖釉面劣化与恢复核心需求，聚焦污染损伤机理、防护涂层研发等关键环节，研究内容具体、技术路线清晰，贴合工程实际，整体符合科研项目大纲要求，对提升隧道行车安全、降低养护成本具有重要作用。 1. 补充隧道有害气体分布与瓷砖釉面劣化的量化关联分析，明确不同污染物（NO₂、SO₂等）对釉面劣化的影响权重，完善劣化机理的试验验证方案。 2. 细化涂层材料研发的试验细节，补充不同配比底漆、中间漆、面漆的性能对比数据，明确涂层适配不同污染程度瓷砖的选型标准。 3. 完善实体工程应用方案，明确关中、陕北、陕南典型隧道的选取标准，补充涂层施工后的长期跟踪检测指标及评价标准。 4. 细化技术经济指标，补充涂层使用寿命、单位面积造价、养护成本降低幅度等量化参数，增强指标的可考核性与说服力。					
评审专家（签字）： 韦虎 2026 年 3 月 18 日 （本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）					

专家审查意见表

项目名称	运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究				
专家姓名	李宗华	职务/职称	正高工	专 业	交通运输
专家单位	陕西西韩城际铁路有限公司			联系电话	15029929222

评 审 意 见

本课题采用对特长公路隧道瓷砖釉面污染物组份及分布规律、隧道内壁瓷砖釉面污染损伤机制、瓷砖釉面恢复涂层的基本性能、瓷砖釉面恢复施工工艺及质量检测等技术研究,拟开发新型瓷砖釉面恢复专用涂层材料,该技术对改善运营隧道日常视觉环境,提升隧道瓷砖日常维护效率,提高司乘人员的行车安全具有一定的意义,研究的必要性强。课题组前期调研比较充分,工作基础扎实,研究内容全面,技术路线清晰,方案合理可行。人员结构合理,依托工程结合较好,计划进度安排合理,预期目标明确,社会经济效益显著。

建议:

- 1、在研究内容中,应充分考虑不同环境下瓷砖釉面损伤多因素耦合老化与叠加效应(如高速气流夹杂粉尘颗粒、冬季除冰盐车辆进入隧道带来的盐颗粒产生录离子、隧道衬砌水害产生的碱离子、洞口段剧烈的温差疲劳等);
- 2、新型自洁涂料研发,应注重与瓷砖釉面的结合力、耐久性、水侵害和瓷砖胚体本身性能、材质的研究;

评审专家(签字):



2026年3月18日

(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究项目（项目编号：25-34K）				
专家姓名	卜东平	职务/职称	正高级工程师	专 业	土木工程
专家单位	中铁一局集团有限公司			联系电话	18991319680

评 审 意 见

一、总体评价

项目选题契合国家及陕西交通科技发展规划，聚焦隧道运营实际痛点，依托工程明确，研究内容、技术路线可行，团队结构合理，经费预算基本合规，具备研究实施基础，综合评定为基本合格。

二、存在主要问题

- 1. 缺 “风险分析与应对措施” 独立模块，无各阶段风险防控预案；
- 2. 未单独列明科研诚信承诺，无数据、成果诚信责任主体及署名规范；
- 3. 应用技术类量化验收考核指标不足，技术经济指标未明确量化标准；
- 4. 成果转化推广路径简略，无陕西区域落地步骤及长效机制；
- 5. 技术路线图内容简略，未体现研究环节逻辑衔接与闭环管理。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 18 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	25-34K—运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究				
专家姓名	许崇帮	职务/职称	正高	专 业	隧道工程
专家单位	交通运输部公路科学研究院			联系电话	15120081075

评 审 意 见

项目研究目标明确，研究内容设置恰当，技术路线基本可行。主要问题与建议：

(1) 特长公路隧道瓷砖釉面污染物分布规律研究，建议考虑隧道跨度（车道数量）、隧道长度、通风、车流量组成及温湿度影响。

(2) 研究应给出隧道侧壁瓷砖釉面损伤等级划分及不同等级下的修复技术或工艺，以指导工程实践。

(3) 隧道侧壁瓷砖釉面恢复涂层应给出附着力、耐湿热等指标要求。

评审专家（签字）：

许崇帮

年 月 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究				
专家姓名	王明年	职务/职称	教授	专 业	隧道工程
专家单位	西南交通大学			联系电话	13808029798

评 审 意 见

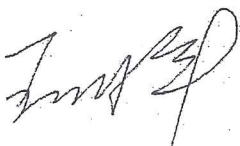
一、总体评价

项目研究内容全面，思路清晰，方法正确。达到了评审要求。

二、建议

1. 进一步加强耐久性、经济性分析？

2. 细化经济技术指标？

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 18 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究 (项目编号: 25-34K)

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	韦虎	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	桥梁 工程	隧道与地下 工程	正高工	韦虎
2	委员	李宗华	陕西西韩城际 铁路集团公司	交通运输	公路工程	正高工	李宗华
3	委员	卜东平	西安建工集团	桥梁工程	桥梁工程	正高工	卜东平
4	委员	许崇帮	交通运输部公路 科学研究院	隧道工程	隧道工程	正高工	网上评审
5	委员	王明年	西南交通大学	隧道工程	隧道工程	教授	网上评审

专家意见处理表

项目名称: 运营公路隧道侧壁瓷砖釉面损伤机理及恢复技术研究项目 (项目编号: 25-34K)

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应, 详细说明修改情况)
1	韦 虎	1、补充隧道有害气体分布与瓷砖釉面劣化的量化关联分析, 明确不同污染物 (NO_2、SO_2) 对釉面劣化的影响权重, 完善劣化机理的试验验证方案; 2、细化涂层材料研发的试验细节, 补充不同配比底漆、中间漆、面漆的性能对比试验数据, 明确涂层适配不同污染程度瓷砖的选型标准; 3、完善实体工程应用方案, 明确关中、陕北、陕南典型隧道的选取标准, 补充涂层施工后的长期跟踪检测指标及评价标准; 4、细化技术经济指标, 补充涂层使用寿命、单位面积造价、养护成本降低幅度等量化参数, 增强指标的可考核性与说服力。	1、在 P42 页补充了 (六) 有害气体浓度与釉面劣化指标的对应关系构建; 2、涂层材料研发过程, 底漆主要关注附着力、中间漆主要功能调节平整度, 面漆主要功能为自洁性能、易清洗、耐老化等性能, 试验过程结合实体工程瓷砖釉面污染进行分类, 确定不同污染程度的瓷砖釉面恢复窗口期; 3、长期跟踪检测指标及评价标准在 P57 页中已补充“二、质量控制研究”; 4、后期将结合依托工程实施, 细化技术经济指标, 结合室内老化试验及现场监测结果, 确定涂层使用寿命。
2	卜东平	1、缺“风险分析与应对措施”独立模块, 无各阶段风险防控预案; 2、未独立列明科研诚信承诺, 无数据、成果诚信主体责任及署名规范; 3、成果技术类量化验收考核指标不足, 技术经济指标未明确量化标准; 4、成果转化推广路径简略, 无陕西区域落地步骤及长效机制;	1、根据交通厅下发的新大纲模版编制; 2、根据交通厅下发的新大纲模版编制; 3、P62 页补充了涂层体系具体的技术指标; 4、推广路径根据交控养护整体部署, 在资金允许及隧道功能需要进一步提升阶段, 建议隧道管理部门结合试验段涂层监测效果对课题研究成果的采用; 5、图 3.1 补充了论文研究过程的技术路线。

韦 虎

		5、技术路线图内容简略，未体现研究环节逻辑衔接与闭环管理。	
3	李宗华	1、在研究内容中，应充分考虑不同环境下瓷砖釉面损伤多因素耦合老化与叠加效应（如高速气流夹杂粉尘颗粒、冬季除冰盐车辆进入隧道带来的盐颗粒产生氯离子、隧道衬砌水害产生碱离子、洞口段剧烈的温差疲劳等）； 2、新型字节涂料研发，应注重与瓷砖釉面的结合力、耐久性、水侵害和瓷砖胚体本身性能、材质的研究。	1、瓷砖釉面损伤机理影响因素研究中，根据釉面物理化学特性，主要考虑酸性气体及机械破坏两个方面影响； 2、P49-51页补充了耐久性、耐久性等方面试验。
4	王明年	1. 进一步加强耐久性、经济性分析？ 2. 细化经济技术指标？	1、结合涂层室内老化试验及现场试验段实施后长期监测结果，得出釉面恢复涂层的耐久性，从而进一步比较其经济性； 2、细化了技术指标，如附着力、耐老化性、VOC 排放的具体指标。
5	许崇帮	(1) 特长公路隧道瓷砖釉面污染物分布规律研究，建议考虑隧道跨度（车道数量）、隧道长度、通风、车流量组成及温湿度影响。 (2) 研究应给出隧道侧壁瓷砖釉面损伤等级划分及不同等级下的修复技术或工艺，以指导工程实践。 (3) 隧道侧壁瓷砖釉面恢复涂层应给出附着力、耐湿热等指标要求。	1、课题组主要结合陕南、陕北、关中地区典型隧道开展污染物成分研究，选取主要污染物成份进行釉面损伤试验，重点关注釉面恢复材料的研发； 2、课题研究过程中将根据釉面光泽度（照度）等指标，给出釉面恢复的窗口期，以帮助隧道管理部门决策； 3、P62补充了涂层附着力、耐久性等方面的具体指标。

申虎

项目负责人（签字）：王育为