

高性能环氧树脂抗滑层在隧道路面的应用研究

韩亚芳, 尹昌宇, 孙杨勇, 吴迪, 曾彦程, 孔海望  
(广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510500)

**摘要:** 针对隧道路面潮湿、半封闭的特点, 研发环氧树脂抗滑层铺装材料, 将其应用于广西大端、潮水隧道, 分析其耐水性、耐高温水煮及耐酸碱腐蚀性能, 并对其与砼基面的粘结、抗滑性能进行长期跟踪。结果表明, 环氧树脂抗滑层在 80 ℃ 热水煮 14 d 后粘结强度为 2.31 MPa 且破坏形式为砼破坏, 经酸碱浸泡 168 h 后外观无明显变化且仍能保持较高的拉伸性能, 使用 1 年后粘结强度仍达 3.2 MPa 且破坏形式为砼破坏; 隧道路面加铺环氧树脂抗滑层后, 路面干燥和潮湿状态下的摆值分别为 85、67, 比原砼路面分别提高 22.5%、67.5%, 构造深度由原 0.33 mm 提高到 1.08 mm, 环氧树脂抗滑层在提高隧道路面抗滑性能的同时具有良好的耐水性、耐久性和耐腐蚀性。

**关键词:** 隧道; 环氧树脂层; 路面铺装; 抗滑性; 耐腐蚀性; 耐老化性

中图分类号: U455                      文献标志码: A                      文章编号: 1671-2668(2018)06-0153-04

目前, 隧道路面铺装多为水泥砼或水泥砼+沥青路面复合形式。水泥砼路面耐久性较好, 但抗滑性、平整性、吸音性较差, 且隧道内易扬尘。与水泥砼相比, 水泥砼+沥青复合路面的抗滑性、平整性、吸音性较好, 但其抗水性差, 坑槽多。加上隧道由于其自身所处环境限制, 容易出现基面潮湿、积水等情况。因此, 有必要开发一种既耐水损害, 又能提供良好抗滑功能及舒适性的铺装材料。

环氧树脂抗滑层是一种以改性环氧树脂为粘结剂、单粒径碎石为骨料的铺装材料, 可赋予路面长久的高抗滑性能, 且具有轻薄、粘结强度高、防水、耐腐蚀、耐高低温性能好等优点。虽然环氧树脂本身具有一定的耐水性, 但能否满足隧道使用要求尚鲜见报道。广西桂柳(桂林—柳州)高速公路大端、潮水隧道位于鹿寨县境内, 交通量较大, 且均位于长坡

段, 对路面防滑性能要求非常高。由于两隧道地处南方, 雨水较多, 隧道内多处渗水, 基面长期处于潮湿状态, 铺装层的耐水性对其使用寿命有重要影响。此外, 铺装层直接与外界环境接触, 其耐腐蚀性也非常重要。该文开发一种具有优良抗滑性能的环氧树脂抗滑层, 对其耐水性及耐酸碱腐蚀性进行研究, 并将其应用于大端、潮水隧道的路面抗滑养护中。

1 环氧树脂抗滑层室内研究

1.1 环氧树脂抗滑层原材料

环氧树脂胶粘剂采用 MRS21 型, 其为一种无溶剂环保型环氧类胶粘剂, 主要技术指标见表 1。耐磨骨料采用单位粒径为 1.18~4.75 mm 的特制耐磨骨料, 其中骨料要求干净、干燥、表面粗糙、无杂色, 技术指标见表 2。

表 1 MRS21 型胶粘剂的主要技术指标

项目	试验结果	参照标准
拉伸强度(50 mm/min)/MPa	20.3	GB/T 1040.3—2006
粘结强度(2.0 mm/min)/MPa	≥2.5(砼破坏)	GB/T 16777—2008
断裂延伸率(厚 2 mm, 23 ℃)/%	49.2	GB/T 1040.3—2006
钢—钢粘结强度(2.0 mm/min)/MPa	19.5	GB/T 6329—1996
钢—钢拉伸抗剪强度(2.0 mm/min)/MPa	17.8	GB/T 124—2008
适用温度/℃	10~40	—

表 2 耐磨石料的技术指标

项目	技术要求	测试结果	测试方法	项目	技术要求	测试结果	测试方法
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	≥2.5	2.7	T0328—200	磨光值/BPN	≥65	73	T0321—1994
含水量/%	≤1.0	0.6	酒精燃烧法	粒度/mm	1.18~4.75	1.18~4.75	筛分法
莫氏硬度	≥7	9	莫氏硬度计法	压碎值/%	≤12	7	T0322—2000

## 1.2 吸水率

水分子是小分子,极性很大,渗透、扩散、取代、水解的能力都很强。无论何处的水都很容易通过胶层侵入、扩散、迁移到界面处,对于胶粘剂粘结性能有巨大影响,其渗入胶粘剂主体后呈现增塑作用,会导致胶结料粘结强度下降、延伸率提高。有研究表明,水分子对粘结耐久性的影响最显著。以环氧—聚酰胺胶粘结 45<sup>#</sup> 钢为例,室温固化 10 d 后测得剪切强度为 24.8 MPa,且为内聚破坏;浸水 15 d 后剪切强度仅为 7.9 MPa,全部发生粘附破坏,且界面处出现锈迹。在多雨天气吸水率较高的胶粘剂易出现界面破坏,容易产生胶层脱落。针对该特性,在原有产品 MRS18 的基础上,通过改变配方及添加功能性助剂降低胶粘剂的吸水率,研发出新产品 MRS21。取国内某公司及国外德信公司同类产品进行测试,试样长×宽×厚为 76.2 mm×25.4 mm×3 mm,采用 ASTM—D570—2005 吸水率测试方法,23 ℃ 水完全浸泡 24 h,测试结果见表 3。

表 3 环氧树脂胶粘剂吸水率测试结果

测试样品	吸水率/%
MRS18	1.502
MRS21	0.337
国内某公司样品	1.343
国外德信公司样品	0.856

由表 3 可知:MRS21 的吸水率仅 0.337%,比 MRS18 下降 77.6%;德信公司同类产品的吸水率为 0.856%,接近技术要求 1%。MRS21 的吸水率达到同类产品领先水平。

## 1.3 耐高温水煮老化性能

大端、潮水隧道夏季高温多雨,隧道内多处渗水(见图 1),基面长期处于潮湿状态,高湿和高温的共同作用极易使环氧胶粘剂中易水解聚合物水解引起大分子降解,导致胶粘剂老化。因此,需对环氧树脂抗滑层进行耐水煮老化性能测试。



图 1 大端、潮水隧道路面渗水状况

水煮老化试验主要测试 MRS18、MRS21 及国

内某公司样品、国外德信公司样品在水煮老化后的粘结性能,观察粘结破坏形式。根据 GB/T 16777—2008,每 3 个砂浆块为一组,将树脂胶结料及骨料按照规定用量分别平铺在砂浆块上,在 (40±1) ℃ 养护 1 d 后,在 80 ℃ 恒温水箱中水煮 14 d 后测试混合料与水泥砼基面的粘结强度,结果见表 4。

表 4 水煮老化后混合料与水泥砼基面的粘结强度

测试样品	粘结强度/MPa	破坏形式
MRS18	1.45	胶层破坏
MRS21	2.31	砼破坏
国内某公司样品	1.83	胶层破坏
国外德信公司样品	1.95	胶层破坏

由表 4 可知:MRS18 高温水煮 14 d 后的粘结强度仅 1.45 MPa,出现胶层处脱落破坏,国内某公司产品、国外德信公司产品也出现胶层处脱落破坏,表明其在高温与水的作用下迅速老化,粘结力下降,胶粘剂粘结层出现脱落破坏,不具有良好的耐水煮老化性能。而 MRS21 高温水煮 14 d 后的粘结强度为 2.31 MPa,且破坏形式为砼破坏(见图 2),表明改性树脂胶粘剂的粘结强度仍高于砼本体强度,耐水煮老化性能较好,可满足交通需要。

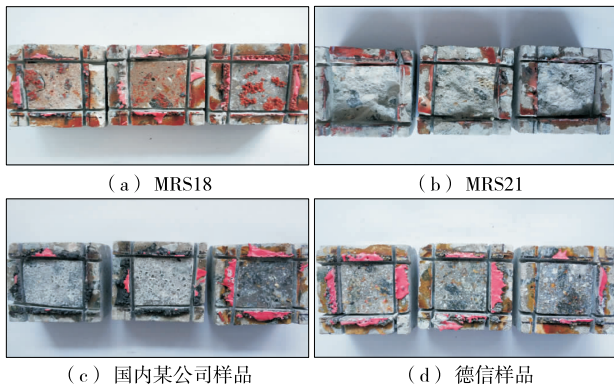


图 2 环氧树脂胶粘剂水煮 14 d 后的破坏形式

## 1.4 耐酸碱腐蚀性能

对于大多数粘结剂,腐蚀性环境比水汽对耐久性的影响更严重,粘结剂浸泡酸碱性溶液后的强度下降比水浸泡更快。考虑到使用后耐久性问题,对环氧树脂抗滑层进行耐酸碱腐蚀性能研究。将胶条及混合料铺装小样板用 25% wt 酸和 25% wt 碱浸泡 168 h,结果见图 3、表 5。

由图 3 可知:MRS21 胶条外观无变化,表面未出现起泡、开裂、小坑或其他类似变化,表面不发黏,颜色仍为浅黄色。铺装小样板由于普通水泥板耐酸

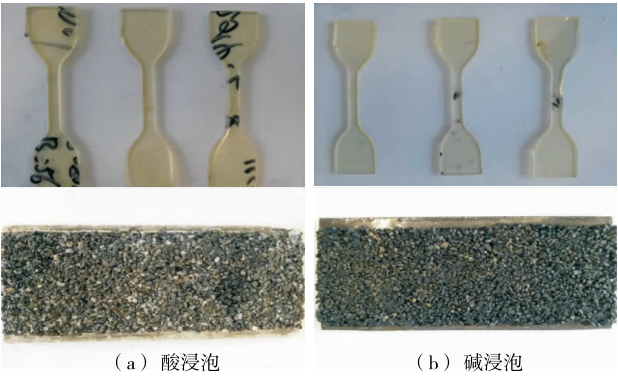


图 3 酸碱浸泡后的拉伸试样与铺装小样板

表 5 MRS21 胶条酸碱浸泡后的拉伸性能

处理条件	拉伸强度/MPa	延伸率/%	强度下降幅度/%
未浸泡	19.1	51.5	0.00
酸浸泡	18.1	25.6	5.24
碱浸泡	16.3	45.1	17.20

性较差,酸浸泡试样出现了明显的基材鼓泡、分层及面层石料粉化现象,但胶膜仍完整;碱浸泡试样的基板为水泥板,石料为特制耐磨石,浸泡后面层仍完整,骨料粘结良好,且面层骨料未出现粉化现象。

由表 5 可知:浸泡后试样的拉伸性能有所下降。经酸浸泡 168 h 后,拉伸强度下降 1 MPa(下降幅度 5.24%),延伸率大幅下降到 25.6%;碱浸泡后,延伸率略有下降(下降到 45.1%),拉伸强度降幅较大(为 17.2%)。但经酸碱浸泡后的拉伸强度仍维持在 16 MPa 以上。总体而言,胶结料具有较好的耐酸碱性能,经酸碱浸泡 168 h 后外观无明显变化且仍能保持较高的拉伸性能,可满足隧道使用条件。

## 2 环氧树脂抗滑层用于隧道面的使用性能

### 2.1 环氧树脂抗滑层铺装工艺

在原隧道水泥砼面铺装环氧树脂抗滑层,先对砼基面进行刨丸,并清理路面,保证路面无灰尘、无油污。摊铺过程中保证材料的厚度与均匀性、骨料无灰尘。施工完成后按照当时温度根据技术指导进行养护。大端、潮水隧道施工中按 15 ℃ 10 h 养护,并开放半幅交通、半幅施工。养护结束后,开放交通前清扫树脂薄层多余骨料,直至表面无脱落骨料。铺装前后路面情况见图 4。

### 2.2 环氧树脂抗滑层与水泥砼基面的粘结性能

影响环氧树脂抗滑层户外老化的最不利因素是高温和湿气,冷热循环、紫外辐射和低温相对来说是



图 4 环氧树脂抗滑层铺装前后的路面

次要因素。树脂层暴露于户外,最初 6~12 个月强度下降很快,2~3 年后下降趋于平稳。将树脂抗滑层铺装于隧道路面正常养护后进行现场拉拔试验,跟踪不同使用时间后树脂抗滑层与水泥砼基面的粘结性能。试验方法:1) 在环氧树脂抗滑层上用取芯机切出一道直径 50 mm、深度 10 mm 的环形槽;2) 用 AB 结构胶将拉拔头固定在环氧树脂抗滑层上,待结构胶固化后进行拉拔。环氧树脂抗滑层与水泥砼基面的粘结强度见表 6,拉拔断面见图 5。

表 6 环氧树脂抗滑层与水泥砼基面的粘结强度测试结果

开放交通时间/月	粘结强度/MPa	破坏形式	强度降幅/%
0	3.5	砼破坏	0.0
4	3.4	砼破坏	2.9
8	3.2	砼破坏	8.6
12	3.1	砼破坏	11.4



图 5 拉拔断面

由表 6、图 5 可知:1) 随着开放交通时间的增加,环氧树脂抗滑层与水泥砼基面的粘结强度略有下降。刚开放交通时粘结强度为 3.5 MPa;开放交通 4 个月后粘结强度为 3.4 MPa,下降仅 2.9%;开放交通 8 个月后粘结强度为 3.2 MPa,下降 8.6%;

开放交通 12 个月后粘结强度为 3.1 MPa, 下降较大, 约 11.4%。2) 破坏形式均为砼破坏, 表明界面粘结与铺装层强度均大于砼本体强度, 使用过程中不会因抗滑层粘结效果差造成层间脱皮或剥落。

### 2.3 摆式摩擦系数

表 7 为环氧树脂抗滑层和隧道水泥砼面的标准温度摆值对比。

表 7 环氧树脂抗滑层和水泥砼面的摆式摩擦系数对比

开放时间/月	摆式摩擦系数			
	水泥砼面		树脂抗滑层	
	干燥	潮湿	干燥	潮湿
0	76	45	95	72
4	74	43	88	69
8	73	44	86	66
12	71	40	87	67

由表 7 可知: 隧道水泥砼面经过铺装环氧树脂抗滑层改造后, 路面的抗滑性能得到提升。原隧道水泥砼面在干燥和潮湿状态下的摆值分别为 76、45, 潮湿状态的摩擦系数接近规范最低线( $\geq 45$ ), 行车存在安全隐患。加铺环氧树脂抗滑层后, 路面干燥和潮湿状态下的摆值分别提高到 95、72, 在经过 1 年使用后干燥状态标准温度摆值仍达到 87、潮湿状态为 67, 表明加铺环氧树脂抗滑层可提高隧道路面的抗滑性能, 且能长时间保持, 可为道路行车安全提供保障。

### 2.4 构造深度

表 8 为环氧树脂抗滑层和隧道水泥砼面的构造深度对比。

表 8 环氧树脂抗滑层和水泥砼面的构造深度对比

开放时间/月	构造深度/mm	
	水泥砼面	树脂抗滑层
0	0.35	1.17
4	0.35	1.12
8	0.34	1.08
12	0.33	1.08

由表 8 可知: 随着使用时间的延长, 水泥砼面的构造深度呈下降趋势; 而改性树脂层在经历初期下降后趋于稳定, 开放交通 4 个月时构造深度下降较快(约 4.3%), 开放交通 8、12 个月时维持在 1.08 mm。这是由于胶粘剂层较薄, 表层骨料与胶粘剂的接触面积较小, 容易被行车磨损掉, 导致构造深度大幅下降; 而底层骨料与胶粘剂的粘结面积较大, 不会被磨损

掉, 因而构造深度趋于稳定。较大的构造深度对于隧道排水及雨天防滑有很大帮助。

## 3 结论

(1) 改性后的环氧树脂胶粘剂 MRS21 的吸水率仅 0.337%, 与国内外同类产品相比优势明显; 经 80 °C 水煮 14 d 后的拉拔强度维持在 2.31 MPa 左右, 且破坏形式均为砼破坏; 经 25% wt 酸碱浸泡 168 h 后延伸率均有所下降, 但拉伸强度仍在 16 MPa 以上。环氧改性树脂具有较好的耐水性、耐水煮老化性能和耐酸碱腐蚀性能。

(2) 隧道水泥砼面铺装环氧树脂抗滑层后, 开放交通 12 个月后的粘结强度下降约 11.4%, 为 3.1 MPa, 且破坏形式为砼破坏, 界面粘结与铺装层强度均大于砼本体强度, 使用过程中不会因抗滑层粘结效果差造成层间脱皮或剥落。

(3) 隧道水泥砼面铺装环氧树脂抗滑层后, 经过 1 年的使用, 环氧树脂抗滑层干燥状态下的标准温度摆值为 87、潮湿状态下为 67, 比水泥砼面分别提高 22.5%、67.5%。环氧树脂抗滑层可提高隧道路面的抗滑性能, 且不会随使用时间增加而大幅度下降。

### 参考文献:

- [1] 杨良, 郭忠印, 杨学良, 等. 公路隧道路面工作环境调研与分析[J]. 公路, 2004(3).
- [2] 闫志国. 长大公路隧道火灾研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [3] Harold V Q, Andy M. Case study: kentucky transportation cabinet's high friction surface treatment and field installation program[R]. Washington: Federal Highway Administration, 2016.
- [4] 孙杨勇, 程庚俞, 尹昌宇. 环氧树脂抗滑层在南方湿热地区水泥混凝土桥面抗滑养护中的应用[J]. 公路, 2015(4).
- [5] 钟鸣. 改性环氧树脂薄层铺装于桥面养护中的应用[J]. 中外公路, 2013, 33(6).
- [6] 陈平, 刘胜平, 王德中. 环氧树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [7] 黄尊行. 耐水性环氧树脂建材胶粘剂研究[J]. 化学工程与装备, 2015(12).
- [8] 李广宇, 李子东, 吉利, 等. 环氧胶黏剂与应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.