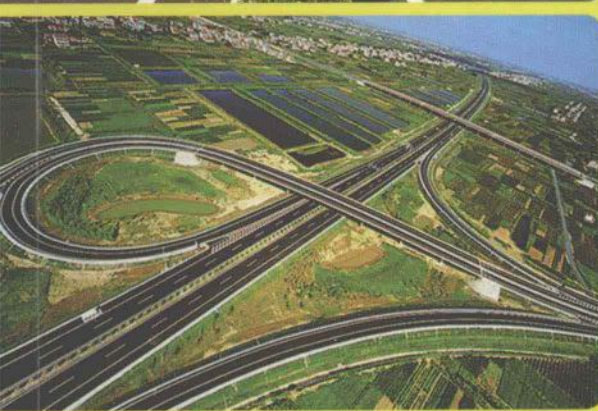
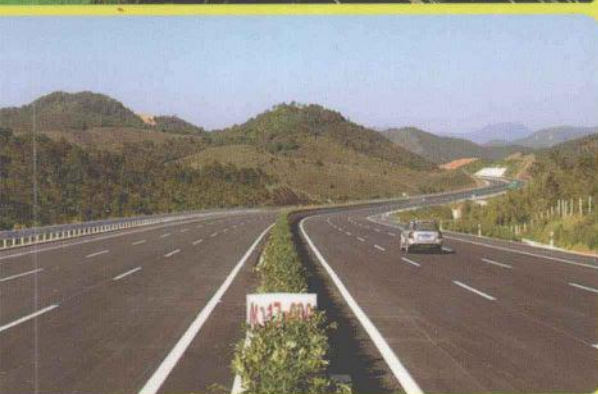


Shanqu caosu Gonglu Jianshe
Jishu Lunwenji



山区高速公路建设 技术论文集

(下)

重庆高速公路集团有限公司 主编



人民交通出版社
China Communications Press

Shanqu Gaosu Gonglu Jianshe Jishu Lunwenji

山区高速公路建设技术论文集

(下)

重庆高速公路集团有限公司 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以重庆“二环八射”高速路网建设和运营成果为依托,从技术创新、人文景观和自然环境等多角度,详细阐述了公路工程技术、桥梁工程技术、隧道工程技术、交通工程及环保景观技术和工程建设管理技术等内容。

本书可供高速公路规划、设计、科研管理人员借鉴参考。

图书在版编目(CIP)数据

山区高速公路建设技术论文集. 下/重庆高速公路集团有限公司主编. —北京:人民交通出版社, 2010.9
ISBN 978-7-114-08615-1

I. ①山… II. ①重… III. ①山区—高速公路—道路工程—文集 IV. ①U412.36—53

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第167059号

书 名: 山区高速公路建设技术论文集(下)
著 者: 重庆高速公路集团有限公司
责任编辑: 沈鸿雁 丁润铎
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号
网 址: <http://www.ccpres.com.cn>
销售电话: (010) 59757969, 59757973
总 经 销: 人民交通出版社发行部
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司
开 本: 880×1230 1/16
印 张: 16
字 数: 472千
版 次: 2011年7月 第1版
印 次: 2011年7月 第1次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-08615-1
总 定 价: 90.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

目 录

三、隧道工程

长大隧道沥青路面用阻燃剂种类及阻燃机理研究现状·····	彭建康 董瑞琨 苏胜斌(3)
隧道钢纤维喷射混凝土性能试验及其工程应用·····	杜国平 刘新荣 祝云华 李 丹 邢心魁(7)
谈重庆山区高速公路隧道群洞口设计 ·····	邓承波 廖 炜 陈志学(13)
TSP203 在重庆铁峰山隧道涌水段超前地质预报中的应用 ·····	李 丹 杜国平 刘 涛 袁 勇 翁其能(18)
羊角隧道交叉段围岩变形破坏机理探讨 ·····	董永康 靳晓光 王心飞(24)
棚洞在渝湘高速公路洪酉段中的应用 ·····	包 飞 胡旭辉(29)
公路隧道支护及衬砌结构无损检测技术及应用 ·····	王连成 胡 浩(33)
西部地区高速公路隧道工程动态设计管理 ·····	钟 宁(39)
公路隧道分类管理技术研究 ·····	陈晓利 李家龙 王小军 郭兴隆(44)
重庆铁峰山特长隧道不良地质路段评价与施工处理 ·····	杜小平 刘 涛 李 丹 袁 勇 周玉石(50)
涌水区隧道地下水处治与水压监测 ·····	刘 亮 翁其能 姚旭朋 段永胜(56)
马垭口隧道塌方事故发生机理分析 ·····	吴 强 刘新荣 杜小平 舒志乐 段永胜(62)
桃树垭隧道初期支护大变形分析与工程处理 ·····	刘新荣 钟祖良 黄林伟 杜国平 刘 亮(68)
内置管棚在隧道塌方处治中的应用研究 ·····	张行鹏 陈 斌(74)
隧道拱部预裂爆破与光面爆破施工技术 ·····	巴福隆(77)
高速公路毗邻隧道及隧道群火灾模式下控制预案研究 ·····	郭 春 施洪乾 王明年 何 川 陈 平 濮家利(80)
马垭口隧道变形换拱施工方案 ·····	杨 维(84)
边坡与隧道锚杆(锚索)无损检测技术 ·····	刘世红 唐树名(88)
隧道围岩与支护体系稳定性数值模拟分析 ·····	柴柏龙 周东平 陶宜满 陈凌云 冯卫强 葛兆龙(92)
虚拟现实技术在毗邻型公路隧道照明控制中的应用初探 ·····	马 非 何 川 方 勇 王文广 孙立东 何 兵(96)
高速公路隧道监控模式和新技术的应用 ·····	杨小柏(99)
基于自助式智能控制的隧道紧急停车带照明控制设计·····	陈 平 张特森(103)
基于数字电台的无线遥测系统在棚洞工程监测中的运用·····	孙建国(106)
光纤 Bragg 光栅应变传感器在隧道中的应用研究 ·····	向昌阳 李 川 谭 华(110)
公路隧道中控制火灾烟流的计算模型·····	陈建忠 李家龙 吴 欢(113)

隧道智能区域控制器在万开隧道监控系统中的应用

- 金朝辉 王 茜 何 川 杜国平 杜小平 曾德云 李 丹 刘 亮(119)
- 公路隧道照明节能技术探讨..... 赵船汎 卿 伟(123)
- 山区高速公路隧道节能型供配电系统的研究及应用..... 赵清碧 任建卫 张 琦(128)
- 路段集合式多隧道整体联动控制流程及控制方案研究
- 方 勇 何 川 李海鹰 张太雄 彭建康 韩 均 敬世红(134)
- 毗邻隧道污染物扩散影响的数值模拟研究..... 曾艳华 何 川 钟 宁 王文广 何 兵 孙立东(140)

四、交通工程及环保景观

重庆高速公路区域监控及综合管理系统开发设计

- 李祖伟 金朝辉 何 川 李海鹰 任建卫 王卫平 陈 平(147)
- 武隆至水江高速公路建设管理..... 孙立东 王心飞 谭 华(150)
- 公平、公正、公开是联网收费建设的基石..... 任建卫(155)
- 浅议“新”高速..... 濮家利(157)
- 公路隧道安全评价指标体系与方法..... 韩 直 孙立东 白 云(161)
- 高速公路路网应急预案体系的思考..... 李祖伟 马 非(166)
- 浅析渝湘高速公路洪西段港湾式停车带的设置..... 张乐华 杨真子 胡晓红(169)
- 渝湘高速洪西段路堑边坡绿化防护试验研究..... 何 群 胡晓红 李福伦(171)
- 公路安全性评价指南中的运行速度模型问题..... 马 璐 吴万佳 田 登(174)
- 山区高速公路机电工程施工过程中的成本控制..... 曾玥琳 张乐乐(178)
- 高速公路基础服务设施功能开发研究..... 刘 影 李木子 陈 锋(182)

五、工程建设管理及其他

- 结合 P3E/C 软件的公路隧道群施工进度控制研究 孙立东 李红镛 刘 涵(187)
- 工程项目管理系统及其在渝湘高速公路洪西段中的应用..... 夏 斌 谭 星(191)
- 渝湘高速公路洪西段工程安全剖析..... 杨真子 张 渝(197)
- 利用计算机技术进行项目管理打造透明工程..... 段永胜 杜国平(203)
- 水界高速公路征地拆迁特点分析及对策探讨..... 赵 刚 程向荣 汤泽远(207)
- 试谈企业在贯彻执行 ISO 9000 族标准中如何管理文件与档案 陈海岚(210)
- 浅析统筹城乡发展中重庆高速公路建设用地问题及对策建议..... 刘宗强(213)
- 浅谈试验检测工作在工程质量控制中的重要性..... 王佳梅 胡 晓(218)
- 重庆绕城高速公路换乘枢纽的运营管理机制与换乘衔接组织管理研究..... 郑 艳 柴 娟(222)
- 关于高速公路变更管理的思考..... 敬世红(227)
- 公路后评价中影响高速公路工程造价的因素分析..... 刘 浪 刘 蓉(232)
- 高速公路建设项目财务管理存在的主要问题及对策..... 杨国书(235)
- 高速公路建设管理中审计关注重点..... 杨晓慧 何 兵(238)
- 公路工程变更造成估量单价合同中单价调整的研究..... 魏道升 孔 政 何柏科(240)
- 公路工程招标评标办法的应用与思考..... 吴万佳 杨 颖 孙晓红(243)
- 后记..... (250)

三、隧道工程

长大隧道沥青路面用阻燃剂种类及阻燃机理研究现状

彭建康¹ 董瑞琨² 苏胜斌²

(1. 北京工业大学建工学院 北京 100022; 2. 重庆大学土木工程学院 重庆 400045)

摘要:概述了沥青阻燃剂的几种典型阻燃原理:吸热、覆盖、抑制链反应及不燃气体窒息作用等;分析了常用沥青阻燃剂的特点及其每种阻燃剂的阻燃机理;介绍了新型的阻燃技术和阻燃思路;展望了长大隧道阻燃沥青混凝土路面的研究方向:低温施工的阻燃沥青混凝土因排放小、热辐射低、有利于施工操作而具有很好的发展前景。

关键词:阻燃机理 沥青阻燃剂 新型阻燃技术 隧道 沥青路面

1 引言

随着我国公路建设的不断发展,公路隧道里程呈逐年增长趋势。目前对道路的安全性和舒适性提出了更高的要求,大量的(特)长隧道已要求铺筑沥青混凝土路面。然而,沥青在空气中是一种易燃材料,在高温下会燃烧,放出大量的烟雾和有毒气体;加之(特)长隧道空间相对封闭,沥青路面燃烧产生的毒气、烟雾和热量很难散失,导致火灾事故发生后人员逃生困难,往往造成灾难性事故,损失惨重。因此,(特)长隧道沥青混凝土路面的阻燃研究对于保证运营安全具有重要的现实意义。

2 阻燃沥青的阻燃原理

沥青的组成极其复杂,一般认为是由沥青质、胶质、芳香分和饱和分四种组分组成。沥青的燃烧是一个放热、分解的物理化学过程,首先熔融、滴落、流淌,接着是熔珠燃烧,再由燃烧的熔珠洒落、流淌,造成火势蔓延扩大,酿成火灾。沥青在燃烧中分解出氢、甲烷及烷烃类等易燃气体。这些气体的燃烧又进一步加快了沥青的热分解。所以沥青火灾的特点是来势猛、扩展快、范围广、损失大。因此,要实现对接沥青的阻燃,首先要保证沥青在受热时不熔滴、不流淌,提高沥青熔点和分解温度;或增加分解气体中的不燃成分或增加燃烧膜中的抑制成分。根据沥青的燃烧过程,沥青阻燃剂的阻燃原理主要有吸热、覆盖、抑制链反应及不燃气体窒息作用等。

2.1 吸热作用

在高温条件下,阻燃剂发生强烈的吸热反应,吸收燃烧放出的部分热量,降低可燃物表面的温度,有效地抑制可燃性气体的生成,阻止燃烧的蔓延。

2.2 覆盖作用

阻燃剂在高温下能形成玻璃状或稳定泡沫覆盖层,隔绝氧气,具有隔热、隔氧、阻止可燃气体向外逸出的作用,从而达到阻燃目的。

2.3 抑制链反应

根据燃烧的链反应理论,维持燃烧的是自由基。含卤阻燃剂可作用于气相燃烧区,捕捉燃烧反应中的自由基,从而阻止火焰的传播,使燃烧区的火焰密度下降,最终使燃烧反应速度下降直至终止。

2.4 不燃气体窒息作用

阻燃剂受热时分解出不燃气体,如 CO_2 、 NH_3 、 HCl 、 HBr 等将可燃物分解出来的可燃气体的浓度冲淡到燃烧下限以下。同时,上述不燃气体对燃烧区内的氧浓度具有稀释作用,阻止燃烧的继续进行,达到阻燃的

作用。

3 常用沥青阻燃剂种类及其阻燃机理

清华大学的龚景松、傅维镛对 90 号、110 号、140 号道路沥青进行了热重分析,发现沥青受热时的质量损失主要发生在 250~530℃温度区间,而且不同沥青热解的失重曲线形状基本相似,质量变化的峰值温度也基本一致,沥青热解的温度具有相似性。因此,可以利用对沥青的热分析(热重分析、示差扫描量热等)来确定沥青裂解的大致起始温度及成炭温度,为阻燃方案的选择提供参考。参照上面对沥青的热解分析,可以将分解温度在 250~400℃的材料作为候选阻燃剂。目前,沥青的阻燃方式主要是围绕着在沥青中添加阻燃剂、抑烟剂来实现的。常见的阻燃剂有有机卤素化合物、铈系阻燃剂、含氮阻燃剂、磷系阻燃剂等,常见的阻燃抑烟剂有氢氧化铝、氢氧化镁、硼酸锌等。

3.1 有机卤素阻燃剂

其在高温下发生分解,释放出 HX(X 表示卤素),HX 能与沥青燃烧时产生的 HO、O、H 等作用,使这些自由基浓度降低,减缓或终止燃烧的链式反应,从而达到阻燃的目的。HX 是难燃性气体,可以稀释空气中的氧,因其相对密度大于空气,会在沥青表面形成保护层,使燃烧速度减缓或熄灭;但 HX 也会增加隧道内烟雾的浓度,增加烟室息的几率。这就决定了卤素阻燃剂不宜单独使用,比较成熟的做法是和抑烟剂一起使用。由于它具有很好的阻燃性,目前在防火工程中大量使用。其中 DBDPO 在燃烧时会产生多溴联苯类及多溴联苯醚类,这两种化合物由于其化学结构与二噁英相似,被怀疑燃烧后会产生二噁英类物质,具有强致癌性。美国雅宝公司率先开发了在相对分子质量、热稳定性和溴含量方面与 DBDPO 相当的十溴二苯乙烷(DBDPE)。DBDPE 不属于多溴二苯醚,燃烧时不产生多溴联苯及多溴联苯醚,可代替 DBDPO 作为阻燃剂。

3.2 含氮阻燃剂

主要是指无机氮盐,如 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 、 $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4Br 等,它们在受热时分解出难燃性气体 NH_3 , NH_3 稀释了空气中的氧浓度,而且 NH_3 在火焰中可发生反应: $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。但這些材料可溶或易溶于水,不能作为主要成分使用,除非做表面防水处理,如美国在 1989 年公布了一种使用硅树脂聚合物对阻燃剂进行处理的技术。

3.3 有机磷系阻燃剂

在热解形成的气态产物中含有 PO,可以有效地抑制 H 及 HO 的链传递。红磷对含氧高聚物阻燃效率高,在沥青阻燃中较少有应用。聚磷酸铵(APP)在受热时会脱水生成聚磷酸,聚磷酸由于具有强烈的脱水性能可以使沥青表面炭化,加上隔绝热量和氧气,从而有效地抑制明火的发生;受热时分解生成的氨气和水蒸气可稀释热分解形成的可燃性气体和氧气,对燃烧具有良好的阻燃作用,而且低毒,热稳定性好。

3.4 氢氧化铝和氢氧化镁

受热时放出结合水,会吸收大量的热,使材料难以达到热分解温度和燃烧温度,通过抑制燃烧进一步达到了抑制发烟的目的;并且水在高温下变成水蒸气时体积急剧增加,稀释了可燃性物质热分解后形成的可燃性气体和烟雾。同时,水蒸气可在高温下与炭粒发生进一步氧化反应,使发烟量降低。碳酸钙对受热分解产生 HCl 的气体有很好的抑烟作用。

3.5 三氧化二铈

与卤系联用具有好的阻燃性,能终止燃烧,产生自熄现象;它本身基本没有阻燃作用,只是与卤系联用有很好的协同效应。但它本身存在潜在的毒性,而且卤—铈阻燃体系的发烟量高(较单独用卤系阻燃剂时还要高),且铈资源有限;它的使用还会使材料燃烧时产生阴燃,对材料的理化性能有不利影响。可以用硼酸锌、氧化锌、氧化锡及其混合物代替三氧化二铈使用。

3.6 硼酸锌

具有阻燃、抑烟、成炭、抑制阴燃和防止熔滴等多种功能,可同时在气相和凝聚相发生作用。这是因为硼酸锌与卤系阻燃剂 HX 混合使用时,受热生成的 ZnX 、 BX ,具有捕捉 HO 、 H 等自由基的功能,使燃烧链式反应难以进行,增加成炭量,促进固相形成坚硬致密的炭层。另一方面,硼酸锌会在高温熔化,覆盖在沥青表面;高温反应形成的硼酸也可覆盖在沥青表面,形成玻璃态的包覆层以隔绝空气和热量。在受热分解过程中,硼酸锌还将释放出大量的结晶水,可有效地降低燃烧体系的温度,并起到稀释氧气的作用,从而抑制了燃烧的继续进行。硼酸锌与卤系阻燃剂及锑化物协同使用时,阻燃效果更加明显。

大量研究表明,单一阻燃剂对沥青的阻燃效果不是很理想,而复合阻燃剂由于具有协同阻燃作用,可以显著提高沥青的阻燃性能。因此,目前对沥青的阻燃大都使用复合阻燃剂。卤系和无机阻燃剂一起使用是目前使用最多的,阻燃效果也比较好,但是存在环保及成本方面的问题,避免使用卤系阻燃剂已成为一种趋势。目前主要是用磷系和氮系阻燃剂来替换卤系阻燃剂。

4 新型阻燃剂和阻燃技术

随着聚合物阻燃技术的发展,沥青阻燃技术也得到了很快的提高。有研究发现,阻燃剂的粒度对阻燃效果也会有影响,氢氧化铝在高压聚乙烯、碳酸钙在聚氯乙烯中粒径越小,阻燃、抑烟效果越好。将纳米化的绿色阻燃剂,氢氧化铝、氢氧化镁、碳酸钙等以一定的方式加入沥青中,相信也会有很好的效果。纳米插层材料已广泛应用于塑料、树脂等材料的阻燃,并且效果很好,相信沥青/层状硅酸盐纳米复合材料也会具备一定的阻燃性能。主要基于以下推理:层状硅酸盐的片层可以在沥青内部起到阻隔作用,减缓和阻碍在燃烧过程中沥青分子链降解所产生的可燃性小分子向燃烧界面迁移,同时也减缓外界的氧气向沥青内部渗透,使得在燃烧界面上的氧化反应难以充分进行,从而起到阻止燃烧的作用。这一作用的结果使沥青的燃烧无法充分完成,最大放热速率也会随之下降。纳米插层阻燃材料是以廉价的层状的硅酸盐材料作为基体,因此有可能大幅度降低阻燃剂的制作、使用成本,并且由于层状硅酸盐不但可以在二维方向上起到增强作用,还可以起到改善沥青混合料物理力学性能的目的。

目前的研究主要是针对沥青的阻燃,而对沥青混合料阻燃的却很少。纤维在沥青混合料中主要起加筋的作用。我国产有一种碱性矿物纤维,价格便宜,类似于石棉纤维但不具有石棉纤维对人体危害性:人体呼吸系统属于酸性环境,石棉纤维的化学组成是硅酸盐,不溶解于酸性环境故对人体有危害。而这种碱性纤维溶解于呼吸系统的酸性环境而消失或圆化,即使深入到肺部也不会长期停留,对人体不会构成致癌的威胁。动物试验和人群流行病学调查表明这种碱性纤维是安全的。这种碱性矿物纤维矿在全世界罕见,在我国分布少储量多,探明储量高达 780 万 t,现在只是作为石棉的安全替代品开采,国内已有人拟开发成沥青混合料的纤维稳定产品和阻燃产品。它可以作为沥青路面的增强纤维和阻燃纤维,特别适用于隧道内的阻燃沥青面层。

有研究发现一种矿粉,可以取代常规的石灰石矿粉,且具有阻燃作用。矿粉的阻燃机理:碱性矿粉在室温至沥青混合料施工温度 200°C 以内保持稳定,不发生任何化学和物理反应;在沥青的燃点 300°C 左右发生阻燃反应,一是脱水吸热阻燃,即碱性(羟基)矿粉失去高比例的结构水,吸收大量的热量,起到阻燃的作用;二是成炭阻燃,即碱性矿粉高活性的分解产物能促进沥青成炭,形成保护层,起到阻燃作用。经过试验表明,碱性矿粉取代石灰石矿粉对沥青和沥青混合料性能没有任何影响。另外,碱性矿粉还具有环保和性价比高的优点。

胡红雨等人采用了一种对沥青混合料进行阻燃改性的颗粒状阻燃改性剂——FRMAX™ 环保型阻燃改性剂。这种改性剂使用方便,无需改变原有生产工序,无需增加任何设备,无需增加任何能源消耗,在保证原沥青混合料路用性能的基础上显著提高了沥青混凝土路面的阻燃性。添加量为沥青混合料的 0.5%,但其没有对阻燃机理进行说明。

5 问题与展望

沥青混凝土路面的阻燃研究目前主要集中在沥青结合料的阻燃研究和评价上,而对沥青混合料的阻燃研究和评价工作开展得较少。实际上,在某些情况下,沥青的阻燃性能和相应的沥青混合料的阻燃性能有着较大的差异。尤其是某些针对沥青混合料而不是针对沥青结合料的改性剂的加入,往往会改变沥青混合料的阻燃性能。因此,很有必要对沥青混合料展开阻燃性能的评价和研究。

(特)长隧道沥青混凝土路面铺筑施工目前使用的还是温度较高的热拌沥青混凝土技术。(特)长公路隧道中摊铺常规热拌沥青路面对现场施工设备、人员以及沥青路面质量都提出了严峻的挑战。高温沥青混合料短时间内在长大隧道相对封闭的空间内必然释放和聚集大量的热量和有害气体。高温容易导致摊铺设备和碾压设备无法正常工作,而沥青高温状态下所释放出的有害气体和辐射热又严重威胁着现场施工人员的身体健康。

开发、研制热辐射低、有害气体排放量小的沥青混凝土,更有利于(特)长公路隧道路面的铺筑施工,同时不损害沥青混凝土路面的路用性能,并且能保证沥青路面的安全运营。因此,低温阻燃沥青混凝土的研究将是阻燃沥青混凝土研究的一个新方向。

参 考 文 献

- [1] 沈金安. 改性沥青与 SMA 路面[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [2] 欧育湘. 实用阻燃技术[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [3] 王永强. 阻燃材料及应用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

隧道钢纤维喷射混凝土性能试验及其工程应用

杜国平^{1,2} 刘新荣² 祝云华² 李丹^{1,2} 邢心魁³

(1. 重庆高速公路集团有限公司 重庆 400042; 2. 重庆大学土木工程学院 重庆 400045;
3. 西安建筑科技大学土木工程学院 陕西 710055)

摘要:为研究钢纤维混凝土喷层在隧道单层永久衬砌支护中的适用性,根据钢纤维喷射混凝土结构力学原理,分析了钢纤维在混凝土中的增强力学作用机制,完成钢纤维喷射混凝土合理配比、抗拉、抗压、抗折及抗折初裂强度和弯曲性能等指标的室内试验,并结合具体的隧道现场喷射试验,以及围岩应力、钢纤维混凝土喷层应力及洞周附加水平收敛等监测数据进行分析。研究结果表明,钢纤维喷射混凝土抗拉、抗折强度高,韧性好,喷层中的应力分布较均匀,具有较好的让压能力,喷射作业回弹损失量减少,说明钢纤维喷射混凝土是一种理想的单层衬砌支护材料,具有较好的推广应用价值。

关键词:隧道工程 钢纤维喷射混凝土 试验 力学性能 单层衬砌

1 引言

钢纤维混凝土作为一种新型建筑材料,近年来在国内外得到了迅速发展。与普通混凝土相比,钢纤维混凝土不仅能明显改善抗拉、抗剪、抗折以及抗渗能力,而且能大大增强断裂韧性和抗冲击等多项性能,所以在道路路面、桥梁结构、隧道衬砌支护等工程中广泛应用。钢纤维喷射混凝土是由均匀散布有钢纤维的混凝土拌和料,借助压缩空气高速喷射成型的新材料,随着其在隧道和地下工程新奥法施工中的推广使用,已越来越引起学术及工程界的重视,并在实际工程中取得了良好的应用效果。

高尔新等^[1]通过钢纤维在喷射混凝土中的受力特性,研究了钢纤维在混凝土中的分布规律;严少华和钱七虎等^[2]采用刚性压力试验机,对不同钢纤维掺量的混凝土进行了单轴压缩荷载作用下的应力—应变全过程试验;范新等^[3]运用拉应力累积损伤破坏准则,通过对钢纤维喷射混凝土支护坑道与其他支护类型的对比,研究了钢纤维喷射混凝土支护抗爆炸震塌能力;丁琳^[4]基于湿喷钢纤维混凝土的力学性质,分析了湿喷混凝土的特点及其在公路隧道中临时与永久支护中的应用。

随着纤维喷射混凝土在地下及隧道工程中的应用日愈增多,对其喷射技术,如材料、增强机制、力学试验、早期强度、应用与设计等方面的研究显得愈加重要。本文采用理论研究、室内试验和现场应用相结合的方法,研究钢纤维喷射混凝土的室内力学性能试验,并通过渝宜高速公路摩天岭隧道通风斜井现场喷射试验及其监控量测结果分析,为钢纤维喷射混凝土在隧道单层永久衬砌中的推广应用提供参考依据。

2 钢纤维混凝土的增强作用机制

普通混凝土基体本身就是一种多相、多组分、非匀质的颗粒型脆性复合材料,其拉压比低(8%~13%)、极限延伸率小(0.01%~0.02%),故在动载和静载作用下,往往过早引起破坏,并全面影响其他性能。在混凝土结构形成过程中,因失水等原因引起收缩,只要收缩应力达到混凝土的抗拉强度,在其内部即出现不同尺度的微细裂纹,加之施工期间带来的毛细孔、气孔等缺陷,气孔直径为0.01~1mm,毛细孔尺度约为气孔的1/1000。其中大于50~100mm的孔,尤其是连通孔,对混凝土的物理力学、化学性能产生很不利的影响。在受力过程中,这些孔缝和缺陷都是裂缝源,在裂缝尖端出现应力集中[图1a)]。

从图1可以看出,只要裂缝尖端有应力集中,裂缝则急剧扩展,降低了混凝土的承载能力,导致其突然的脆性破坏,从而使混凝土的固有理论抗拉强度远远不能发挥,普通混凝土的理论抗压强度可达103MPa数

量级,而实际抗压强度仅有 101MPa 数量级。但是,如果在混凝土基体中掺入不同数量的钢纤维,因钢纤维的阻裂效应,则产生如图 1b)、c)所示的情况。跨越裂缝和靠近裂缝尖端的纤维,使得混凝土的断裂能量提高 50~200 倍,应力传递给裂缝的上、下表面,随着纤维体积掺率的增大,裂缝尖端应力集中程度不仅能缓和,且有消失的可能。在混凝土结构形成过程中,钢纤维阻止裂缝引发,减小与缩小裂缝源尺度和数量;在受力过程中,又抑制了裂缝引伸和扩展,缓和了裂缝尖端应力集中程度。这意味着采用钢纤维混凝土可能引起开裂和变形,但仍保持有很强的承载能力,能在相当长的时间内维持围岩的稳定性。这对在岩石支护过程中必须考虑连续变形问题具有重要意义。

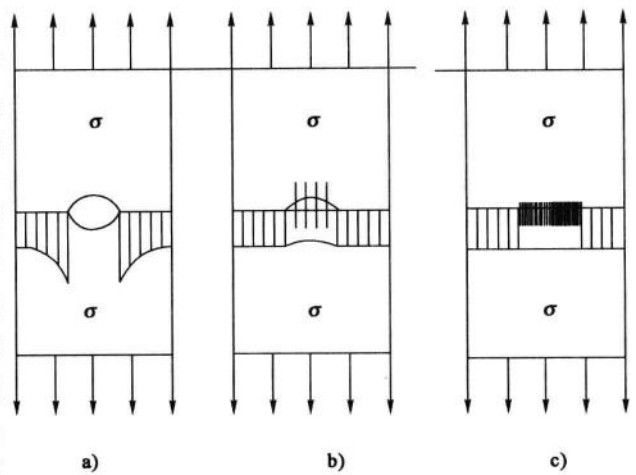


图 1 钢纤维对应力集中作用示意图

3 钢纤维混凝土力学性能室内试验

3.1 试验材料

试验采用的钢纤维为重庆宜筑商贸有限公司生产的剪切波浪型钢纤维,当量直径 0.5mm,长径比 60,抗拉强度大于 500MPa;水泥采用华新牌 325 级普通硅酸盐水泥;粗集料为隧道现场机制碎石,粒径为 6.0~10.8mm 连续级配;细集料采用摩天岭机制砂和宜昌细河砂的复合细集料,其中机制砂占细集料的 70%,宜昌细河砂占 30%,复合细集料细度模数为 2.7;外加剂选用德国巴斯夫公司生产的高效无碱液态速凝剂;硅粉掺量为水泥用量 1.80%。

3.2 试验配比

钢纤维喷射混凝土配合比的选定,除了考虑其抗压强度的要求外,还必须考虑其抗弯强度、弯曲韧度系数和抗折性能的要求。试验时钢纤维的几何参数保持不变,着重研究其体积掺率的变化($V_f=0.0\%、0.4\%、0.6\%、0.8\%$)对钢纤维喷射混凝土力学性能的影响。经多次室内试验,确定钢纤维喷射混凝土配合比为:水:水泥:石:砂=1.0:2.0:2.5:2.0,速凝剂掺量占总质量的 7%,采用先干拌后湿拌的方法拌和。其配合比见表 1。

钢纤维喷射混凝土试件材料组成

表 1

试验编号	纤维长径比	水灰比	水泥质量 (kg/m ³)	水质量 (kg/m ³)	砂的质量 (kg/m ³)	石子质量 (kg/m ³)	硅粉掺量 (kg/m ³)	减水剂掺量 (%)
S-1	60	0.46	441	226	1 180	598	36.8	0.8
S-2	60	0.48	441	226	1 180	598	36.8	0.7
S-3	60	0.48	441	226	1 180	598	36.8	0.8
S-4	60	0.48	441	226	1 180	598	36.8	0.9
S-5	60	0.47	441	226	1 180	598	36.8	0.8

3.3 试件制作

喷射混凝土与模筑混凝土在施工工艺、混凝土的成型以及力学性能方面有所不同,为了使室内试验能反映喷射混凝土的实际情况,试件采用现场喷射制作,隧道内养护 2d 后脱模运至试验室标准养护,在试验室养护 7d 后进行切割、打磨,成型试块,在标准养护室内养护至 28d 龄期后进行试验。本试验混凝土基体设计强度等级为 C30。

3.4 试验结果及分析

所有试验按照《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13:89)进行制作与养护,试验采用 WAW—2000 型微机控制电液伺服万能试验机,试验采用应变率控制的加载方式,应变率为 $10^{-4}/s$,试件选用 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 立方体及 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$ 小梁试件,分别进行抗压强度、劈裂抗拉以及抗折强度等相应试验。

(1) 钢纤维喷射混凝土抗压强度

同级别配比条件下,钢纤维混凝土与普通混凝土应力—应变曲线如图 2 所示。从图中可以看出,钢纤维喷射混凝土的弹性模量略小于普通混凝土的,并且抗压强度提高幅度不大,在同样大小的峰值应力作用下,钢纤维的掺入可以提高混凝土的峰值应变;普通混凝土应力—应变曲线下降段更陡,而钢纤维喷射混凝土的曲线更为平滑,荷载达到峰值后,并非突然下降,提高了韧性,表明普通喷射混凝土呈脆性破坏特征,而钢纤维增强混凝土却表现出明显塑性变形破坏特征。这主要是由于钢纤维的抗拉强度远大于普通混凝土,在基体开裂后由于纤维的黏结作用,使得复合体有明显的残余变形阶段,且韧性明显提高,表现出很大的峰值后变形能力;另外,从钢纤维混凝土抗压试验破坏形式可以看出,其无碎块、无崩裂,基本上保持原来的外形,仅出现了裂缝和小量的表面剥落,进一步说明由于钢纤维的掺入,使得混凝土由脆性破坏变为延性破坏。

(2) 钢纤维喷混凝土抗拉强度

试验结果表明,钢纤维混凝土比同样配比的普通混凝土的抗拉强度提高了 58.63%。分析其原因,当掺入钢纤维后,由于纤维与基体黏结作用,当复合体中的混凝土材料达到极限抗拉强度后,纤维与水泥胶浆硬化体的界面黏结力阻止裂缝的进一步扩展,因钢纤维的抗拉强度很高,将拉应力传至未开裂的混凝土硬化体上,直至邻近硬化体的应力达到极限抗拉强度时又产生新的微裂缝。如此进行下去,产生多缝断裂,同时将过高的拉应力集中向远处转移,使结构内的拉应力逐渐趋于均匀分布,并最终主要由钢纤维承担,因此钢纤维混凝土的抗拉强度大大提高。

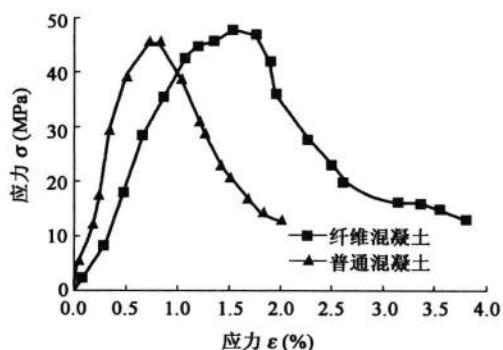


图 2 钢纤维混凝土与普通混凝土应力—应变曲线

(3) 纤维掺率对钢纤维混凝土抗压、抗拉强度的影响

钢纤维体积掺率 V_f 与抗压、抗拉强度关系曲线分别如图 3、图 4 所示。从图中可以看出,7d 和 28d 时可以看出钢纤维喷混凝土的抗压、抗拉强度随着 V_f 的增加而提高。28d 时, V_f 从 0.0% 增加到 0.8%,抗压强度只提高了 21.7%,而抗拉强度则提高了 96.5%,抗拉强度的提高更为明显;当 V_f 从 0.0% 分别增加到 0.4%、0.6% 和 0.8% 时,抗拉强度分别提高了 55.4%、89.2% 和 96.5%。由此可见, V_f 为 0.6% 时,钢纤维对混凝土抗拉强度的增强效果已经很好,当 V_f 继续增大时,对抗拉强度的提高效果不再显著;至于 V_f 为 0.4% 时出现较低的抗压强度,是因为振捣不均使得钢纤维喷混凝土试件出现过多的蜂窝,造成其内部不密实。

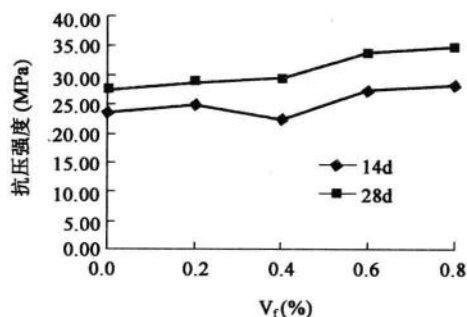


图 3 钢纤维体积掺率与抗压强度关系曲线

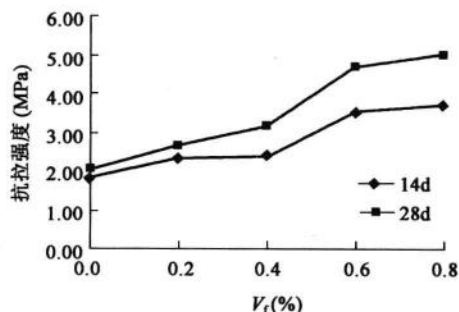


图 4 钢纤维体积掺率与抗拉强度关系曲线

(4) 抗折强度和抗折初裂强度

试验测得不同 V_f 情况下钢纤维喷射混凝土的抗折强度 f_r 和抗折初裂强度 f_{cr} 的值如表 2 所示。初裂点按照《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13:89)中的规定确定。

抗折强度和抗折初裂强度

表 2

V_f (%)	f_r (MPa)	f_{cr} (MPa)	f_r/f_{cr}	V_f (%)	f_r (MPa)	f_{cr} (MPa)	f_r/f_{cr}
0.0	4.68	3.75	0.81	0.6	8.27	6.09	0.73
0.4	6.93	5.16	0.75	0.8	8.61	6.36	0.74

从表 2 可以看出,当 V_f 从 0.0% 分别增加到 0.4%、0.6%、0.8% 时,钢纤维喷混凝土的抗折强度 f_r 分别提高了 48.1%、76.7%、84.0%;抗折初裂强度分别提高了 37.6%、62.4%、69.6%;而比值 f_r/f_{cr} 从 0.81 减小到 0.74。由此可见,掺入钢纤维对喷射混凝土抗折强度的提高要优于对抗折初裂强度的提高效果,钢纤维的掺入对混凝土的抗折强度有明显的提高,但当 V_f 从 0.6% 增大到 0.8% 时,对抗折强度的提高变得不明显。

(5) 钢纤维喷混凝土的弯曲性能

在实际隧道锚喷支护工程中,喷射混凝土层会承受弯矩作用。试验弯曲韧性指数测试方法采用 ASTM C1018 韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{30} ,分别计算 3.0 倍、5.5 倍和 15.5 倍初裂点挠度处的初度值,采用综合评判指标 $R_{10,30}$ 来确定钢纤维混凝土的韧性。图 5 给出了钢纤维喷混凝土荷载—挠度曲线。钢纤维喷混凝土弯曲韧性指数见表 3。从图 5 及表 3 可以看出:

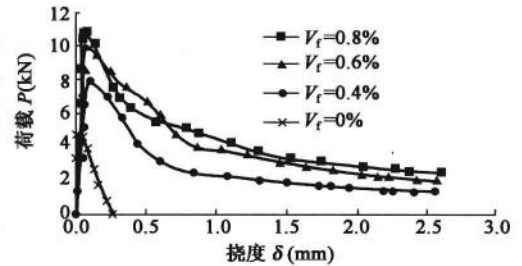


图 5 荷载—挠度关系曲线

① 钢纤维喷混凝土的初裂强度有一定提高,其峰值荷载提高比较明显,当钢纤维体积率达到 0.8% 时,峰值荷载比同样配比的素混凝土提高了 1.3 倍。

② 钢纤维的加入对于混凝土韧性的增强效果十分显著,未加钢纤维的混凝土刚达到破坏荷载时其荷载—挠度曲线便急速下降,而加入钢纤维以后,荷载—挠度曲线即使在混凝土已开裂、挠度非常大的情况下仍很平缓。

③ V_f 从 0.4% 增加到 0.8% 时,钢纤维增强作用基本上随纤维掺量的增加而增大。其峰值荷载、韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{30} 都在增大,说明 V_f 越大,钢纤维喷混凝土的韧性也越高。试验中,素混凝土在达到极限抗弯强度后,试件立即折断,呈脆性破坏;而钢纤维喷混凝土观察最终破坏时的断面,可以看到钢纤维仅有少量被拉断,其大部分被拔出。

钢纤维喷混凝土弯曲韧性指数

表 3

试件组号	初裂荷载 (kN)	峰值荷载 (kN)	ASTM C1018			
			I_5	I_{10}	I_{30}	$R_{10,30}$
1	4.21	4.76				
2	6.67	7.82	4.33	8.27	22.58	71.55
3	7.69	9.75	4.64	9.03	26.13	85.50
4	9.28	10.93	4.94	9.86	27.79	89.65

4 工程应用分析

4.1 工程概况

摩天岭隧道是国家重点公路杭州—兰州高速公路巫奉段关键性控制工程,为一座上、下行分离的四车道特长隧道,隧道左线长 7 280m,右线长 7 353m。根据隧道需风量及地形地质条件等因素综合考虑,在左右线各设置斜井 1 座,分别对左右线进行送排风,其中隧道 1 号斜井长 1 367.31m,倾角 $24^{\circ}21'48''$,最大埋深

822m。隧址区穿过的地层由新到老有下统嘉陵江组(T_{1j})和大冶组(T_{1d}),岩层主要为薄~中厚层弱风化隐晶质灰岩、白云质灰岩及泥灰岩。隧道斜井洞身段原设计采用复合衬砌,II~III 初期支护由径向锚杆,钢筋网及喷射混凝土组成,二次衬砌采用 35cm 模筑素混凝土。该隧道围岩较完整、稳定性良好,施工开挖洞段岩面干燥,按原设计施作二次衬砌施工难度和危险性都很大。因此,对采用钢纤维喷射混凝土作为隧道单层永久衬砌进行研究是十分必要的。

根据设计要求,在隧道 II、III 级围岩地段选取 100m 采用钢纤维网喷射混凝土作为单层永久衬砌试验。表 4 给出了湿式喷射钢纤维混凝土现场试验段(XJ1K0+702~+802,共 5 段,每段 20m)强度值。现场试验表明,钢纤维湿式喷射混凝土,其拌和料的和易性良好,强度达到了设计要求,早期强度高,强度离散性小,实测的喷射回弹损失率拱部为 14.7%,边墙部位 7.5%,作业粉尘浓度 $1.56\text{mg}/\text{m}^3$ 。

钢纤维湿式喷射混凝土现场试验强度(XJ1K0+702~+802)(MPa)

表 4

组号	抗压强度			抗拉强度			平均抗压强度			平均抗拉强度		
	7d	14d	28d	7d	14d	28d	7d	14d	28d	7d	14d	28d
S-1	25.81	42.35	46.33	1.85	2.94	3.51	27.59	36.11	43.52	2.08	2.64	3.03
S-2	27.43	33.21	38.75	2.06	2.46	2.87						
S-3	28.55	31.06	43.26	2.38	2.82	3.25						
S-4	26.84	36.32	42.49	2.13	2.65	3.07						
S-5	29.31	37.62	46.78	2.02	3.21	4.43						

4.2 现场监测与分析

为了研究钢纤维混凝土喷层的实际力学性能和隧道围岩的稳定情况,对钢纤维喷射混凝土试验段进行了现场监测。监测时选择钢纤维混凝土喷层试验断面 3(XJ1K0+752)进行现场监控量测。监测主要内容包括周边收敛、混凝土喷层应力及围岩应力。

(1) 隧道周边收敛

隧道周边收敛量测是量测隧道表面两点间的距离变化,量测仪器采用 SWJ—IV 型收敛计。隧道收敛时态曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,试验断面 3 净空日收敛速率最大值为 $0.551\text{mm}/\text{d}$,平均收敛速率为 $0.263\text{mm}/\text{d}$,虽然收敛速率曲线前期有一定的波动,但波动范围较小,实测收敛曲线在 15d 内即趋于平稳,说明喷射钢纤维混凝土单层衬砌与围岩共同变形体系稳定性良好,表明钢纤维喷射混凝土具有较好让压支护的特点。

(2) 混凝土喷层应力

混凝土喷层应力采用振弦式混凝土应变计进行量测。在试验断面 3 的左边墙、左拱腰、拱顶、右边墙、右拱腰对称点各埋设一组混凝土应变计。应变计处于混凝土喷层中间,测试方向为隧道径向应力。钢纤维混凝土喷层应力变化曲线如图 7 所示。

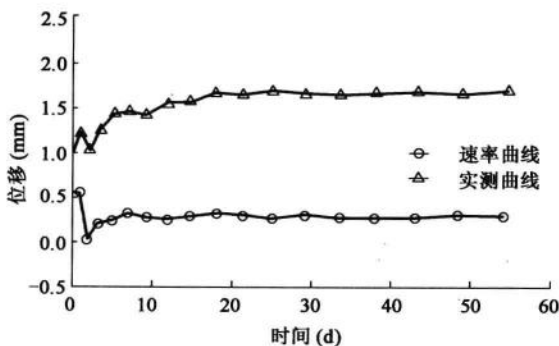


图 6 隧道收敛时态曲线

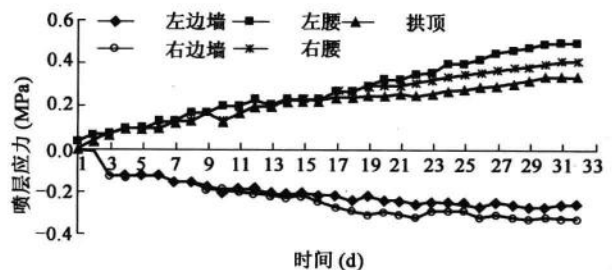


图 7 钢纤维混凝土喷层应力变化曲线

从图7可以看出,监测点所测的混凝土喷层应力较小,左腰处压应力最大,最大压应力为0.51MPa。从喷层应力变化趋势来看,各测点出的应力变化随时间的增加而增加,测试初期混凝土应力有一个快速增长阶段,而后趋于平稳,钢纤维混凝土喷层应力的增长率逐渐减小并趋于0,说明衬砌受力较小且很快趋于稳定,这与收敛监测结果是一致的。

(3) 围岩压力

围岩压力采用JXY-3型双膜压力盒与钢弦频率测定仪进行配套量测,在拱顶、拱腰和边墙腰各对称点埋设压力盒。钢纤维混凝土段围岩应力变化曲线见图8所示。

从图8可以看出,测试初期围岩应力随着时间而增长,但趋于平稳,测试钢纤维混凝土喷层支护各测点围岩压力值较小,围岩最大应力出现在右腰处,为0.27MPa。监测结果表明,钢纤维喷射混凝土的延性和韧性不仅使得衬砌与围岩紧密接触,填塞、封闭围岩裂隙,而且在同隧道围岩共同变形过程中持续有效地提供支护抗力,有助于围岩通过应力调整,形成足够大的塑性区,充分发挥隧道塑性区岩体的卸载作用,使传到支护体上的压力大为减小。

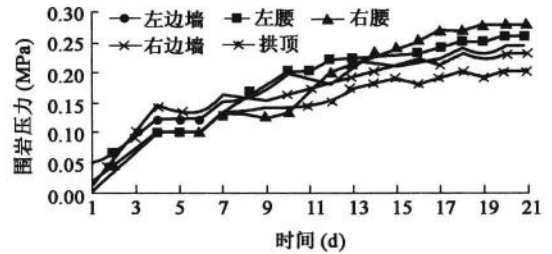


图8 钢纤维喷射混凝土段围岩应力变化曲线

5 结论

本文通过对钢纤维喷射混凝土的室内力学性能试验及其增强机制研究,并结合实际工程的应用可以得出如下结论:

(1) 喷射混凝土由于钢纤维的掺入,从根本上改变了普通混凝土材料的性质,使之由脆性材料变成柔性材料,当钢纤维混凝土喷层受压开裂时,仍具有一定的承载能力,适宜用于隧道的柔性支护。

(2) 钢纤维体积掺率 V_f 从 0.0% 增加到 0.8% 时,喷射混凝土的立方体抗压强度提高 21.7%,抗拉强度提高 96.5%,抗折强度提高 84.0%,说明钢纤维的掺入能够在一定程度上提高混凝土的抗压强度,而对抗拉、抗折强度和弯曲韧性的提高则非常明显。

(3) 现场喷射试验结果表明,钢纤维喷射混凝土用作隧道单层衬砌支护,其早期强度高,回弹率少,施工工艺简单,在适宜的地质条件下,钢纤维混凝土可作为隧道单层永久衬砌支护结构。

(4) 隧道及地下工程中,喷射混凝土材料的腐蚀对其支护结构耐久性具有很大影响。由于汽车尾气有可能造成混凝土炭化,导致开裂,影响支护耐久性,因此,对隧道钢纤维喷射混凝土单层永久衬砌的耐久性性能试验需要开展进一步的研究。

参考文献

- [1] 高尔新,李元生,薛玉,等. 喷射混凝土钢纤维分布特性分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 202-203.
- [2] 严少华,钱七虎,孙伟,等. 钢纤维高强混凝土单轴压缩下应力—应变关系[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(2): 77-80.
- [3] 范新,章克凌,王明洋,等. 钢纤维喷射混凝土支护抗常规爆炸震塌能力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1437-1442.
- [4] 丁琳. 隧洞衬砌中湿喷钢纤维混凝土的应用[J]. 岩土力学, 1996, 17(1): 36-40.