

# 高性能隧道防火涂料的产业化推广

庄勋港<sup>1,2</sup> 蔡建坤<sup>1,3</sup> 蒋斌杰<sup>1,4</sup> 许一婷<sup>1,4</sup> 戴李宗<sup>1,4</sup>

1. 福建省防火阻燃材料重点实验室, 福建, 361005
2. 漳州市消防支队, 福建, 363000
3. 厦门市消防支队, 福建, 361000
4. 厦门大学材料学院, 福建, 361005

**【摘要】** 鉴于隧道火灾特点及其危害性, 隧道防火的重要性与日俱增。涂装隧道防火涂料是隧道防火的有效方法, 文中简述了隧道防火涂料的防火机理, 研制原则及制备流程。福建省防火阻燃材料重点实验室开展隧道防火涂料的研制, 项目产品 DP-3 型混凝土隧道防火涂料完成在厦门大平公司的中试, 并投入市场, 产生良好的社会、经济效益, 实现了隧道防火涂料成果产业化推广。该涂料已应用于数十项隧道工程的防火涂装, 均一次性通过项目验收, 获得优良评价。

**【关键词】** 消防 隧道防火 涂料 产业化

## 一、前言

为了缓解地面交通的压力, 地下空间被有效利用, 全世界的公路、铁路、地铁隧道越来越多。隧道不仅用于交通运输, 还用于光纤电缆、电力电缆、输油、输水管的通道; 随交通流量的不断增长, 危险品运输量的增多, 车辆行驶速度的加快, 隧道火灾的危险性呈上升趋势, 隧道安全防火的重要性也越发凸显出来。鉴于隧道火灾的破坏性和危害性, 在隧道砌体上涂刷防火涂料已经成为国际上通用的做法。

据最新统计, 欧洲地区交通隧道网络总长超过 10000km; 我国仅公路隧道就有 1780 余座, 总长度达 800km; 铁路隧道 6875 余座, 总长度 3700 多 km, 均列世界第一。而在未来 10-15 年内, 欧洲约有 2100km、亚洲 2350km、南美 650km、北美 650km 总长度的隧道要建设, 而中国近几年已建成大量隧道, 包括几条超长海底隧道, 例如近期竣工的厦门东通道工程翔安海底隧道 (中国大陆第一条海底隧道), 项目全长 9km; 广深港客运专线隧道工程 (难度最

大的海底隧道工程), 隧道全长 10.8km; 青岛胶州湾湾口海底隧道, 隧道工程全长 6170m; 上海崇明隧道 (世界上直径最大的海底隧道) 总长 25.5km, 直径 (外径) 15m。随着隧道工程的迅速发展, 隧道安全防火得到国际社会的普遍关注。

关于隧道火灾频率, 各地区统计资料变化幅度较大, 通常取火灾频率为 2.5 次/亿车公里。近十年各国发生的隧道重大火灾事故如表 1 所示。

表 1 十年来各国交通隧道重大火灾事故统计

序号	发生时间	隧道名称	伤亡、损失情况
1	1995. 10	阿塞拜疆地铁	289 人死亡
2	1996. 11	英法海底隧道	财产损失重大
3	1999. 03	法国~意大利边界 Mont Blanc 隧道	39 人死亡
4	1999. 05	奥地利 Tauern 隧道	12 人死亡, 49 人受伤
5	2001. 10	瑞士圣哥达隧道	13 人死亡

序号	发生时间	隧道名称	伤亡、损失情况
6	2001.11	奥地利某旅游隧道	172人死亡
7	2003.2	韩国大邱地铁	196人死亡, 140余人受伤
8	2003.1	英国伦敦地铁	至少32人受伤
9	2005.8	法国巴黎地铁	19人受伤
10	2005.5	瑞典斯德哥尔摩地铁	12人受伤
11	2006.8	美国纽约地铁	10余人受伤

隧道火灾的毁损主要由热量及腐蚀性燃烧气体的大量扩散造成。火灾发生时,火焰温度高、烟气毒性大,封闭环境易造成人员疏散、救援、排烟及灭火困难,严重危及隧道内人员的安全,并导致物资的毁损,设施的破坏。火灾的另一危害性还在于破坏隧道的结构,降低隧道的稳定性,甚至导致坍塌。

## 二、隧道防火涂料

### 1. 隧道防火保护现状

隧道的墙壁和拱顶由不耐高温的钢筋混凝土构成,在高温作用下钢筋混凝土会产生裂纹和丧失强度<sup>[1]</sup>。混凝土强度在300℃以下变化不大,300℃以上时,混凝土的强度随着温度升高而降低。当温度升到600℃时,混凝土的强度下降约50%。这是由于高温下水泥石及其集料等发生物理和化学变化,体积改变造成强度下降。受热初期,混凝土中水泥石的自由水和结合水开始脱出,同时发生热膨胀;温度升至200℃,水化硅酸盐胶体的结晶水开始脱出,体积产生收缩,但混凝土整体膨胀和收缩处于相对平衡状态;温度升至300℃,水化铝酸钙的结晶水开始脱出,水泥石的收缩进一步扩大;温度升至400℃,水合氧化钙开始脱水,混凝土收缩加剧<sup>[2]</sup>。这些变化大大损害了混凝土的强度。钢筋混凝土强度的急剧下降导致了隧道的最终坍塌,造成人员伤亡。

为此,世界各国为解决隧道防火保护问题展开了大量、广泛的研究。隧道防火保护的关键就在于要尽可能地阻止外界的热量向钢筋混凝土传递。其主要措施有:提供不计入结构剖面的额外混凝土厚度、在混凝土中添加聚丙烯纤维、安装喷淋灭火系

统、在隧道衬体上喷涂防火涂料等。

### 2. 隧道防火涂料

防火涂料一般分为膨胀型和厚涂型。膨胀型防火涂料一般限于要求耐火极限不超过2h的大跨度钢结构建筑,而且,作为基料的有机树脂受热会产生浓烟及有害气体,且潮湿环境下不易膨胀,不适合在隧道内使用。厚涂型防火涂料利用无机基质本身固有的绝热性及防火添加剂的吸热作用来起到防火隔热的作用。一般含有颗粒状、纤维状的填料如蛭石、岩棉等。其优点是不燃,能阻隔火灾热量向保护体传递,宜用于隧道防火。因此,隧道防火涂料多属于一类无机非膨胀厚涂型防火涂料。

#### (1) 隧道防火涂料防火机理

要使燃烧不能进行,需将燃烧的三个要素(可燃物、氧气、热源)中的任何一个因素隔绝开。隧道防火涂料防火保护原理为:涂料喷涂在隧道内拱顶和侧壁混凝土的表面,由于涂料中加入了硼化物、铝的氧化物等无机阻燃剂,一旦发生火灾,这些添加剂能在高温下在被保护基材的表面形成玻璃状薄片,起隔绝空气、隔断火焰和隔热的作用,而且阻燃剂所含的结晶水受热时分解成的水蒸气可作为稀释剂降低可燃气体的浓度,并覆盖在被保护基材的表面起到隔绝氧气,阻止燃烧的作用。防火涂层能有效地阻隔火焰和热量,降低热量向混凝土及其衬内钢筋的传递速度,以推迟其温升和强度变弱的时间,从而提高其耐火极限,达到防火保护的目<sup>[3]</sup>。

#### (2) 隧道防火涂料的研制原则

考虑到隧道本身的特点,在研制隧道防火涂料时,根据其应用环境,应遵循以下原则<sup>[4]</sup>:

①发展水性和环保型隧道防火涂料,尽量减少或避免因生产、施工或燃烧造成的环境污染和人身危害。

②涂料燃烧时应避免毒害性气体产生,以便于隧道火灾的扑救。

③隧道渗水的问题至今没有彻底解决,在研制隧道防火涂料时,不仅要考虑涂料的耐火性能,还必须兼顾耐水性。

④隧道中车辆通过时,会产生强风及震动,因此,隧道防火涂料对隧道内砌混凝土基体应有足够的粘结强度<sup>[5]</sup>。

⑤隧道工程工期较紧，施工量大，涂料应便于施工。

⑥为使涂料能推广应用，必须充分考虑产品的成本。

目前隧道防火涂料存在的主要问题是：涂料组分中含有较多轻质多孔无机矿材料，主粘接剂为无机硅酸盐，极易吸水使涂层受潮；另外，防火涂层外表面易受汽车所排放酸性尾气的腐蚀。因此，本项目提出将具有包覆成膜功能的聚合物对多孔无机矿材料进行表面修饰，提高耐水性；同时，在隧道防火涂料底层及表面涂覆聚合物基纳米复合材料，阻止山体渗水对涂层的侵蚀，并改善涂层的耐酸碱性能。

### 三、研发过程及产品应用推广

#### 1. 研发过程

福建省防火阻燃材料重点实验室所研制的隧道防火涂料在厦门大平公司进行中试，确定了产品的生产技术配方和工艺路线后，实现产业化生产。产品（“大平牌” DP-3 混凝土隧道防火涂料）申请“国家防火建筑材料质量监督检验中心”的型式检验；检测报告显示，产品各项性能指标均达到或超过了 GA98-2005 标准要求。涂层密度低，质轻，绝热性好，粘结强度较高，能承受隧道所处的强风和震动环境。

在隧道防火涂料的研制过程中，注重知识产权保护。已申请了6项国家发明专利（授权5项），2项国防专利。发明专利的创新内容涵盖了目前隧道防火涂料的所有技术关键，并已发表5篇学术论文，所开发的产品“钢结构建筑与隧道防火涂料”在2007年中国国际工业博览会获得“中国高校展区优秀展品奖”。基于上述基础，已将“大平牌” DP-3 混凝土隧道防火涂料投入市场，收到良好效益，实现了隧道防火涂料成果产业化推广。

#### 项目产品的关键技术：

(1) 水性单组分混凝土隧道防火涂料<sup>[6]</sup>。由无机粘接剂、隔热材料、增强纤维、防火助剂、聚合物粘结剂等组成，兼具无机材料刚性、聚合物柔性，轻质和优异的耐水性。

(2) 聚合物/层状硅酸盐纳米插层技术在隧道防火涂料领域的应用<sup>[7,8]</sup>。聚合物/层状硅酸盐插层及剥离复合材料增加了水分子和气体在材料中扩散途

径的曲折程度，从而获得良好的阻隔性能，防止山体渗水带来的防火涂层性能劣化和汽车酸性尾气对防火涂层的腐蚀。此外，采用具有包覆成膜功能的聚合物对多孔无机矿材料进行表面封闭提高耐水性，降低涂层密度，提高粘接强度和防火性能。

(3) 聚合物-无机复合粘接体系建立<sup>[9]</sup>。聚合物粘结剂和硅酸盐粘结剂复配技术，提高涂层粘接性能的高温连续性，改善涂层耐水性、柔韧性，减少涂层高温骤冷条件下易爆裂、脱落，常温下易粉化、受潮、附着力差等缺陷。

(4) 复合纤维自替代技术<sup>[10]</sup>。不同耐火等级纤维在涂层中形成三维互穿支撑网状结构，避免涂层高温爆裂，实现耐火性能连续性。

(5) 超细活性粉料低温烧结技术<sup>[10]</sup>。由多种亚微米、纳米尺度的材料组成，包括氢氧化铝、氢氧化镁、二氧化硅、二氧化钛、锆英砂、石灰石、氧化锌、锻烧高岭土、超细硅灰石粉及聚合物对层状硅酸盐的插层产物等，除赋予涂层填充修饰功能外，重要的在于降低涂层陶瓷面（体）的烧结温度，能在较宽的温度范围烧结成陶，极大的提高涂层强度，特别是保证涂层耐火性能的发挥和粘结性的延续、提高。

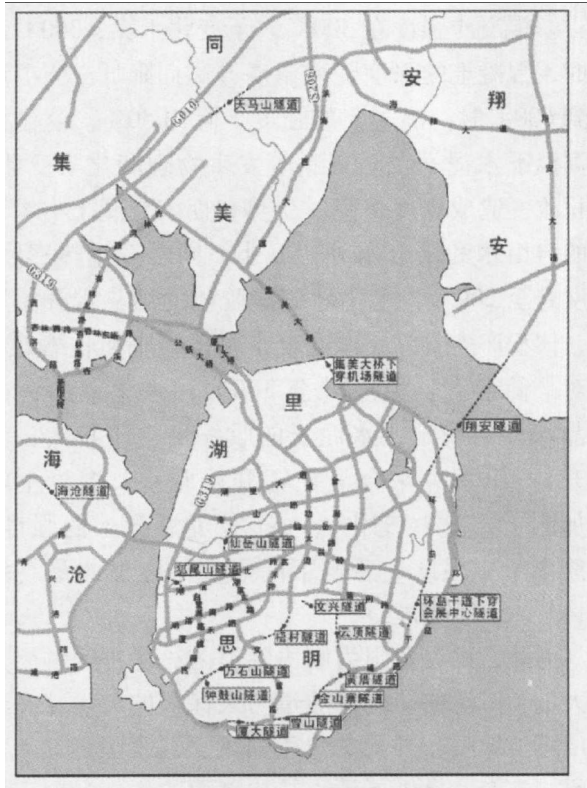


图1 厦门市岛内外主要隧道分布图

## 2. 成果产业化及施工案例

自2007年DP-3型混凝土隧道防火涂料开始在大平公司中试,并已实现产业化生产。该涂料已应用于数十项隧道工程的防火涂装,均一次性通过项目验收,获得优良评价。

至2010年底,厦门市建成投用的隧道总数将达到20条,总里程可达74km多。其中不少隧道都创下了“全国第一”,而到时岛内隧道将有14条,这种隧道密度在国内罕见,图1为目前厦门的主要隧道分布图。其中大部分隧道都应用了DP-3型混凝土隧道防火涂料。包括厦门成功大道梧村山隧道(即厦门机场路JC5合同段隧道),总长约2000m,涂装面积约28000m<sup>2</sup>;厦门环岛干道金山隧道群,含曾山隧道(单洞880m)、金山寨隧道和黄厝隧道(2500m),均为双洞,总长约6760m,总涂装面积约100000m<sup>2</sup>;厦门成功大道龙山隧道(即厦门机场路JC2合同段隧道),双洞,总长约450m,总涂装面积约6500m<sup>2</sup>;厦门天马山隧道,双洞,总长5320m,总涂装面积约120000m<sup>2</sup>。

DP-3型混凝土隧道防火涂料以其优良的性能,也在厦门市外及福建省外实现了众多的成功的施工案例。例如漳州市南靖县山梅公路甘芳隧道,单洞,长约1200m,涂装面积约15000m<sup>2</sup>;江西瑞赣高速于都隧道,左洞1780m,右洞1800m,总涂装面积约50000多平方米;江西瑞赣高速峡山隧道,右洞涂装面积47000m<sup>2</sup>。

此外,从2007年9月起,该隧道防火涂料在湖北沪蓉西高速公路隧道FH04合同段隧道群得到了重大的应用,其中包含:香炉山隧道、葛耳山隧道、红岩寺隧道、崔坝隧道、付家坡隧道、大水井隧道、沈金淌隧道、石柱槽隧道八个隧道,均为双洞,总涂装面积达到了41万多平方米,目前仍在施工中。

## 四、小结

隧道防火涂料在提高隧道结构耐火极限等方面起到积极作用,并且在降低外部火灾带来的损失和修复成本方面,产生潜在的、巨大的经济效益和社

会效益。在推动防火材料产业结构完善、促进行业技术进步,在预防隧道火灾、提高耐火极限、降低火灾带来的危害等方面具有积极意义。至2008年10月,仅福建省高速公路通车里程已达1365km,在建里程1243km,“一纵两横”高速公路主骨架网初步形成。福建省是一个多山地区,大量的隧道伴随着高速公路建设,仅沿海厦门地区隧道里程已经超过170km,在闽西北更是隧道桥梁交替出现,隧道防火涂料具有广阔的应用前景。

## 【参考文献】

- [1] 彭立敏. 隧道火灾后衬砌承载能力的可靠度评估方法[J]. 中国铁道科学, 1998 (12): 4-7.
- [2] 程小伟. 隧道防火涂料的制备及表征[D]. 成都: 四川大学, 2005: 5-6.
- [3] Liang H, Shi Wenfang. Thermal behaviour and degradation mechanism of phosphate di/triacrylate used for UV curable flame-retardant coatings [J]. Polymer Degradation and Stability, 2004 (84): 525-532.
- [4] Duquesne S, Magnet S, Jama C. Intumescent paints: fire protective coatings for metallic substrates [J]. Surface and Coatings Technology, 2004 (180): 302-307.
- [5] Dragovich D. Fire, climate, and the persistence of desert varnish near Dampie, western Australia [J]. Palaeoecology, 1994 (111): 279-288.
- [6] 戴李宗, 黄晓平, 等. 隧道防火涂料及其制造工艺 [P]. 中国发明专利 ZL200310115526. 6, 2004.
- [7] 戴李宗, 张卓, 等. 基于聚合物/粘土插层改性技术的隧道防火涂料修饰剂及其制备方法 [P]. 中国发明专利 ZL200510085694. 4, 2005.
- [8] 戴李宗, 黄晓平, 等. 基于纳米表面处理技术的隧道防火涂料及其制造工艺 [P]. 中国发明专利 ZL200310115525. 1, 2004.
- [9] 戴李宗, 庄勋港, 等. 聚合物改性水泥基厚涂型钢结构防火涂料 [P]. 中国发明专利 ZL200410085382. 9, 2005.
- [10] 戴李宗, 庄勋港, 等. 基于超细粉体低温烧结和自替代复合纤维技术的钢结构防火涂料 [P]. 中国发明专利 ZL200410087822. 4, 2005.