

文章编号:1006-2106(2007)03-0040-05

长大交通隧道防灾设计探讨^{*}

赵运臣¹ 方 正^{2**}

(1. 中铁隧道集团有限公司, 河南 洛阳 471009; 2. 武汉大学, 武汉 430027)

摘要:研究目的:随着我国交通事业的发展,长大交通隧道不断修建,隧道防灾成为日益重要的研究课题。

研究方法:本文主要从隧道火灾的主要因素与危害及隧道防灾技术2个方面对国内外长大交通隧道防灾研究与设计进行评述,并从隧道衬砌结构的防火保护技术、安全疏散技术、固定消防技术、通风排烟技术、火灾监测及灾害时的车流疏导技术、区域交通管理系统等方面系统总结在隧道防灾方面的研究成果与应用情况。

研究结论:我国在长大隧道防灾方面研究缺乏系统性,与国外有明显的差距,体现长大隧道防灾设计中存在不少问题,如隧道衬砌结构防灾设计研究不充分、交通疏散设计随意性大,在运营过程中管理救灾体系落后,管理水平不高等。因此,期望本文能对我国长大交通隧道防灾设计健康发展有一定意义。

关键词:防灾设计;隧道衬砌;消防技术;通风技术

中图分类号:U452 **文献标识码:**A

Exploration on Disaster Prevention Design of Long Traffic Tunnels

ZHAO Yun - chen¹, FANG Zheng²

(1. China Railway Tunnel Group Co. Ltd, Luoyang, Henan 471009, China; 2. Wuhan University, Wuhan, Hubei 430027, China)

Abstract: Research purposes: For the sake of the development of the traffic infrastructures in China, more and more long traffic tunnels are built. Therefore, prevention of disasters inside tunnels becomes one of the most important research topics.

Research methods: In this paper, the researches and designs on disaster preventions of long traffic tunnels made in China and foreign countries are presented in respect of causes for and damages of fire disasters and disaster prevention technologies. The results of researches on tunnel disaster preventions and their applications are summarized in the paper in respect of fire - resistance technology of tunnel linings, safe evacuation technology, fixed fire extinguishing technology, ventilation and exhaust - air releasing technology, fire detecting technology, vehicle guiding technology in case of fire and regional traffic management technology.

Research conclusions: Lacking of consistency, the researches made in China on disaster preventions of long tunnels are lagging far behind those made in foreign countries. The disaster prevention designs of long tunnels in China have many problems, such as insufficiency in researches and designs of disaster resistance of tunnel linings, great random in design of vehicle evacuations, poor rescuing systems during operation stages and poor tunnel management levels. It is hoped that the paper can make some contributions to the sustainable development of the disaster - prevention designs of long traffic tunnels in China.

Key words: disaster prevention design; tunnel lining; fire extinguishing technology; ventilation technology

* 收稿日期:2006-09-07

** 作者简介:赵运臣,1973年出生,男,高级工程师,现任中铁隧道集团科学研究所新技术开发室总工程师兼武汉长江隧道工程副总工程师;方正,1962年出生,男,教授,博士生导师。

1 概述

随着我国国民经济和社会的快速发展,综合国力不断得到增强。我国修建城市和跨地区的交通基础设施建设正处关键时期,大规模地建设城市轨道交通、铁路、公路和管道运输体系是今后我国交通运输工程发展的重要环节。在我国已修建很多长大隧道,如22 km长的兰武二线乌鞘岭隧道,18 km长的秦岭终南山特长公路隧道及大量的地铁及市政公路隧道。同时还有大量长大交通隧道正在或即将修建。隧道发生火灾,往往引起大量的人员伤亡和财产损失,特别建设在市区的过市政公路隧道车流量大、人员密集、各种电缆电气设备负荷大,火灾的危险性和火灾损失巨大,在灾害防治方面与野外的一般公路和铁路隧道有一定的区别,如韩国地铁火灾(2003年伤亡超过189人),阿塞拜疆首府巴库地铁火灾(1995年,340人伤亡)、奥地利Kitzseinhorn隧道火灾(2000年,153人伤亡)、1979年的日本大坂隧道大火(有174辆车焚毁,7人死亡,2人受伤,修复隧道的费用加上停运2个月的收入损失达67亿日元)。在欧洲Mont—Blanc隧道(1999年3月——法国/意大利)、Tauern隧道(1999年5月——奥地利)、Gothard隧道(2001年9月——瑞士)等隧道火灾悲剧促使欧洲修改地下工程安全程序,已修改欧洲交通隧道法规涉及范围更广,也更精确,要求对已修建隧道按同样安全标准进行改进。因此对于隧道工程的运营安全,世界各国都非常重视,特别是长大隧道火灾防治专门列为当今重要的研究课题。例如日本、瑞士、奥地利等国纷纷进行研究和实地模拟隧道火灾实验,研究火灾的危害性及消防对策。欧洲20世纪60—70年代就开始了尤里卡——EU499FIRETUN隧道防火项目,目前随着新问题的出现,又开展了FIR(Fire in tunnel,2001年3月1日启动),DARTS(Durable And Reliable Tunnel Structures,2001年3月1日启动),SAFE—T(2002年启动)以及投资1300万欧元的大规模隧道防火研究项目——UPTUN(Cost-effective, Sustainable and innovative upgrading for Fire Safety in Existing Tunnels,2002年9月1日启动)。

国内在“八五”期间,由铁道部组织铁道部科学研究院西南分院、广州铁路局、兰州铁道学院、长沙铁道学院等单位对隧道的火灾报警与消防方法进行了研究,完成了单线铁路隧道火灾消防方法的1:3模拟试验和消防方法论证等工作。铁道部科学研究院西南分院有学者进行过“隧道火灾封堵燃烧状况的模拟试验研究”。公路隧道方面,针对18 km长的秦岭终南山特长公路隧道,西南交通大学对长大隧道的火灾性状、

火灾情况下的通风排烟等开展了一系列的大比例火灾模型试验。中国人民武装警察部队学院对隧道火灾封堵后的缺氧燃烧行为、特征、燃烧熄灭及安全启封条件进行研究。综合国内外的研究现状,目前国内外对隧道风险控制研究的重要性和必要性已经达成共识,并开展了较广泛的研究工作,取得了一定的成果,为提高隧道的施工及运营安全发挥了积极的作用。但我国对长大隧道防灾总体上缺乏系统的研究,在防灾设计上比较混乱。

2 隧道火灾的主要因素与危害

2.1 产生火灾的原因

通常情况下隧道的灾害主要包括火灾、水淹、爆炸和地震。根据国内外隧道风险评估,证明最大的风险是在隧道内出现交通阻塞的同时发生严重的火灾。产生火灾的原因大致有3种:

- (1) 由车辆本身起火或两车相撞所引起;
- (2) 由运输危险品的车辆爆炸、泄漏所引发;
- (3) 由于隧道内的电气设备故障而发生。

2.2 火灾的危险性

火灾是隧道的主要灾害,因为隧道火灾的危险性在于:

- 2.2.1 经济损失大,人员伤亡多。
- 2.2.2 火灾蔓延快。地下交通隧道的管道、风道以及斜洞本身的结构特性都十分有利于火灾的蔓延,如果在发生火灾时未能及时控制通风设备,则更会加快火灾蔓延。
- 2.2.3 浓烟积聚不散,人员疏散困难。地下隧道无窗户,出入口少。火灾发生后浓烟无法排出,迅速充满全洞,造成缺氧和能见度降低,人员逃生困难。
- 2.2.4 温度上升快。地下工程密闭条件好,热量不易散出。火势猛烈阶段,温度可达1000℃以上,加上疏散距离长,烟的扩散速度比人员逃生速度快等,对人员逃生十分有害。
- 2.2.5 扑救困难。隧道出入口少,通道狭窄,以及浓烟、高温、缺氧、有毒、视线不清、通信中断等原因,大型灭火设备无法进入,救人、灭火难度较大。

因此隧道的防灾重点也是火灾的防治,国际上一些发达国家的城市如东京、巴黎、伦敦以及香港等都采取了十分严格的防火措施,特别是近年来欧洲国家对于城区隧道的防灾制定了越来越严格的规定。

3 隧道防火灾技术

3.1 隧道衬砌结构的防火保护技术

根据试验,高强度混凝土在450℃会丧失其抗压

强度的 40%,而在 600 °C 其抗压强度会丧失 75%。2001 年 10 月 25 日,瑞士阿尔卑斯山区隧道发生车祸,引起的大火造成 20 人死亡,大火使隧道顶部坍塌,严重影响消防人员的救援工作。在其他隧道火灾中由于忽略隧道的内部结构防火,火灾以后造成隧道内部结构的损坏也是代价惨重。所以目前已初步达成共识,为了防止火灾中隧道结构的跨塌而造成隧道自身的破坏,阻止人员的疏散以及消防人员的扑救等危害性,并减少火灾的直接经济损失以及造成的间接影响,对隧道内部提供结构防火保护是很有必要的。但隧道衬砌防火保护必须合理,如果防止火灾产生的热量传递到隧道结构中,热量就可能留在隧道中的空气和烟雾中,就会增加危及生命安全的危险,并增加损害隧道中的设备的危险,隧道内衬的耐火性能取决于隧道结构中所用设计着火的性能,在大多数公路隧道中的着火性能设计至少为 100 MW,在通风系统中,使用的设计着火性能通常要高一些。

根据美国、日本和欧洲一些国家的做法,一般有两点,一是较少隧道内部的火灾荷载,如限制卡车、大型

运输车辆及特殊危险车辆(如油罐车、危险品运输车)通行等措施,另一措施是对结构进行防火保护,如在隧道衬砌混凝土掺聚丙烯纤维,在高温情况下溶解后混凝土中会形成无数的空穴,使易于水蒸气疏导,明显地减小混凝土爆裂显现,隧道衬砌采用复合衬砌,增加二次衬砌的防火安全储备,同时在二次衬砌内表面采用防火板或防火涂料进行防护;对于采用盾构法施工隧道,为了提高防火能力,多采用复合衬砌,一般一次衬砌为钢筋混凝土管片,一次衬砌规定按承受全部荷载进行设计,二次衬砌以增重和防灾为目的,采用现浇钢筋混凝土结构。日本(Furitsu Yasuda)等人对盾构隧道衬砌不同防火措施进行试验,如图 1 所示,根据试验结果,即使采用防火混凝土管片,在管片表面安装防火层也是必要的。采用防火板、防火石英纤维和防火喷射砂浆层均具有明显的防火效果。火灾试验后,采用防火板混凝土管片表面没有可见的变化,防火石英纤维和防火喷射砂浆层同样没用明显的变化,只是管片表面颜色有变化。

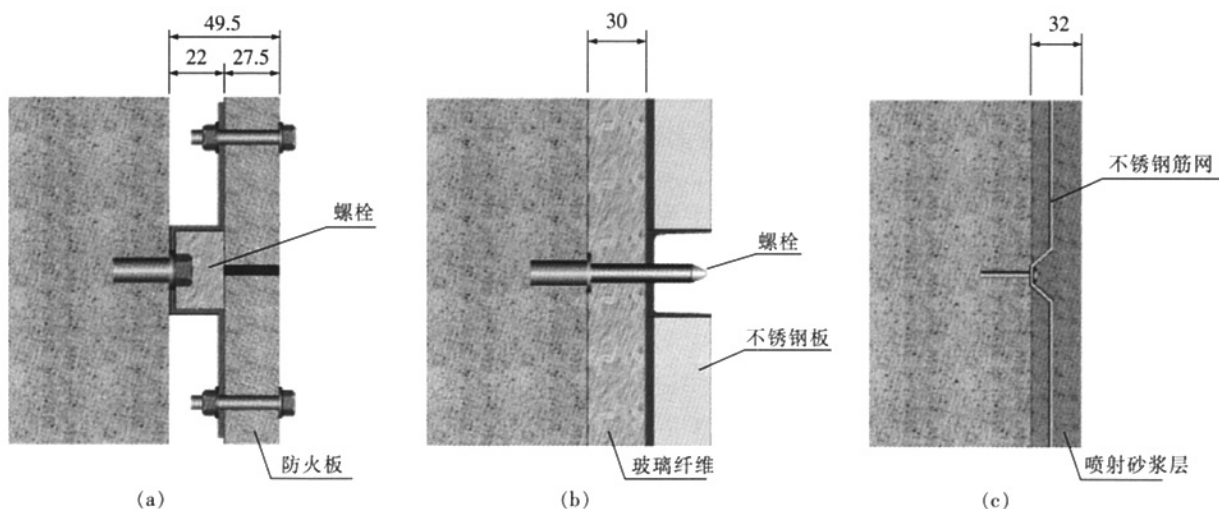


图 1 防火材料敷设图(单位:mm)

但对于长大隧道具体防火措施如防火涂料、防火板材、防火砂浆选取以及组合防火方式的确定等一系列问题在今后的设计仍有待解决。

3.2 灾害时隧道内人员的安全疏散及诱导技术

安全疏散始终在防火设计中占有很重要的位置。特别在较长的隧道中,如何来确定人员疏散方式及疏散距离更为重要。在欧洲,是以一带有 2 个小孩的妇女在火灾时的疏散时间、距离作为指标,一般火灾工况下以 300 m 左右为标准设置逃生口或避难所。安全避难所可以在消防队员赶到现场之前给乘客提供保护直至消防队员救出他们,还能为消防队员提供一个短时

逃离烟雾和热气的场所。有些隧道还设置 1 条管廊供给灾害时人员进行疏散。对于较长的隧道通常采用双向分离的两孔隧道,如果设计单孔隧道一般应设平行服务通道(服务通道在施工阶段具有超前地质预报,确保施工安全,加快施工速度作用),2 条隧道间设消防联络通道,消防联络通道的最大距离为 1 500 m(不同国家要求不同),对隧道运营阶段维护与防灾具有重要的作用。这种设计是必要,国内部分隧道工程因种种原因取消部分或全部消防联络通道做法值得探讨,在设计之前应进行充分的防灾安全论证,盲目减少或取消联络通道的后果可能非常严重,同时不利于我

国交通隧道防灾设计的健康发展;部分长大隧道采用单孔隧道方案设计,如京广线大瑶山隧道(长14.8 km,双线后增加服务通道),武合客运专线大别山隧道(双线14 km)等,这种设计对隧道运营阶段维护非常不利,同时为隧道防灾留下隐患。

同时在隧道内必须合理设置帮助人员逃生的信号和标记,当发生紧急事件时,隧道使用者要能够很容易地找到安装在隧道的紧急逃生设备和紧急出口。信号或标志应安装在较低的位置,确保他们不会被烟雾遮盖,大多数国家现在粘贴在隧道上的标志,表明两个方向离紧急出口的距离。标志采用荧光材料制造,即使在照明系统发生故障时,仍然可以看到。紧急出入口也需要让逃生的人很容易的鉴别。在出入口两侧设置紧急照明系统。

在上海目前建设的几条单向双管廊隧道内,防灾时人员疏散采用横向与纵向相结合的方式,隧道的车道板下设置了安全通道,使其与隧道两端的(盾构)工作井内安全通道相连,日本清涵隧道在过海部分就设置了23 km附属通道。在地面上每隔60 m设一安全口,当发生火灾后地面上的盖板通过中央控制室打开(采用液压系统),人员可以疏散到车道下面。另外在两隧道之间分别设立2条连接通道作为横向疏散,当一孔发生火灾事故时,人员可由安全通道进入另一孔隧道迅速疏散。同时考虑火灾时风机的运行方式,使隧道内烟雾不会向连接通道内扩散,确保人员疏散安全。日本和香港的一些隧道还考虑设置应急指示灯,通过自动报警和电视监控并根据火灾不同的着火位置设定相应的逃生方向,这样可以大大减少人们逃生的盲目性。但这种动态诱导系统必须与隧道的具体布置、应急照明、交通指挥信号等一并考虑。

3.3 隧道的固定消防技术

根据国内外消防设施的调查目前主要采用了灭火器、消火栓和水喷淋及水喷雾系统。在整条隧道内,每隔一定的距离提供1个应急点(100~200 m)。每个应急点有1个电话,2个灭火器和1个消防栓以供应急使用。应急设施其作用是为了扑灭初期火灾,一般是供非专业人员使用,或提供火灾报警和请求援助,应提供消防设施的使用详细说明。消火栓系统是在火灾扩大而灭火器不起作用时灭火使用,一般为专业人员使用,消防栓标准间距为50 m,一般根据当地标准确定,取决于当地用于紧急救援的水龙带的长度。但在长距离隧道的消火栓系统供水方式、水源保证方面仍需要进一步研究。此外,近年来国内外采用的自动灭火系统中开始考虑采用水喷淋和喷雾灭火装置。水喷雾灭火系统具有灭火减烟功能,同时用水量少,管道细

小,消防供水排水简单等优点。1967年在日本铃鹿隧道火灾发生了烧毁13辆卡车之后,日本有关方面在两条简易隧道中进行了汽车火灾试验,验证了隧道内水喷雾的冷却效果,据此开发了隧道内水喷雾设备并在隧道设计中得以应用。上海在1996年延安东路南线隧道首先开始采用了水喷雾系统,北京金融街地下隧道工程也采用水喷淋系统进行火灾保护。但在水喷雾系统的启动方式,与排烟系统的联动技术,水雾喷头的设计参数的选用上仍不是十分成熟。此外近年来在地上建筑中开始应用的细水雾灭火系统具有水量微小,几乎不占用空间、没有水渍的突出优点也可以考虑在隧道中使用。这项技术在德国的一些隧道、电缆廊道中广泛使用。

3.4 隧道的通风及排烟技术

通过对大量隧道中火灾而造成人员死亡的原因研究表明,导致人员死亡的原因主要是逃生过程中吸入了大量烟气微粒。因此,在长距离隧道中有效地排放烟气或者对烟气流进行合理的更换控制是相当重要的。目前隧道排烟基本上和通风方式相结合,在正常情况为通风功能,满足环保的要求,而在火灾情况下为排烟、控烟功能,其主要目的为司乘人员创造一个安全的疏散路线和提供一个通往火场的洁净路线,帮助救火人员到达火灾现场。根据排烟的方式包括:横向排烟方式、纵向排烟方式以及组合方式。横向通风排烟方式、排烟效果最好,但占用空间大,造价高。上海打浦路隧道及延安东路北线隧道就采用这种横向通风方式。纵向通风方式通过在隧道内产生纵向风流达到通风目的,在排烟时改变射流风机转向。上海几条新建的越江隧道(延安东路南线隧道,外环线隧道及即将新建的大连路、复兴路隧道)都采用此方式。此种方式只是控制烟气流方向,没有专门的排烟通道,造价低。但可能在长距离隧道中需要较多空间安装风机,在设计中也必须详细研究不同火灾荷载情况下的火灾蔓延、烟气流动规律,确定火灾时控制烟气流所需的纵向风速,并考虑火灾规模及隧道坡度的综合指标,从而来确定风机的功率及台数,这在理论上存在一定的技术难度。目前国际上一些火灾科学家已能通过流体计算软件模拟出不同情况下的隧道烟气流动现象,可以大致较为准确地确定风机的工作状态。

3.5 火灾监测及灾害时的车流疏导

早期发现起火点,并且及时地采取措施,使其不扩大成灾是隧道消防设计中的一个重要环节。美国规范要求自动火灾探测系统必须能够在15 m范围内确定火灾的位置。且必须至少提供2种探测系统,确定及定位隧道内的火源。

根据国内外目前状况,一般在隧道的电缆层设置缆式火灾报警系统,在隧道车行段设置温感或烟感报警系统。近年来欧洲隧道中安装的最流行的火灾探测系统是来自于 LIST 系统。这种系统使用电缆内内装式传感器。也有许多隧道安装光纤传感器探测系统。但总体上来说,目前这些现代火灾探测技术并不是十分成功。通常应配备火灾探测、事故探测系统、人工火警按钮、紧急呼叫电话、可视火警等,但由于车行段火灾温度一般较难直接触发报警系统,所以在设计中报警系统探测器的选用上应充分考虑到报警点和实际着火点位置的误差及以后的维护。同时也需要在隧道内设置闭路电视监控系统作为被动监测系统,由控制中心值班员监视整条隧道,可以在发生火灾(或其他灾情)时与自动监测系统配合及时了解准确的地点、现场的灾害和乘客疏散情况。与此同时,系统还必须考虑灾害时消防救援车辆的进入,以及隧道内部上下游车辆、人员的疏散撤离等多种因素。为了使各种设备协调工作,确保隧道正常运营、人身安全及提高车辆通过能力,还必须对隧道两侧入口、风井、区间等区域实行统一监控、集中管理,以达到防灾、消灾和疏导交通的功能。这些都需要对隧道本身进行系统的分析研究。

3.6 交通管理系统

城市内的交通隧道,一般交通流量大,在各种缓解交通的措施中,避免交通阻塞是在发生火灾时,减小风险的主要措施。而避免交通阻塞的最佳方案是采用交通管理系统。采用交通管理系统的优点,不仅是紧急情况时所采用的应急措施,而且可用一般情况下的隧道风险补救措施,其有效性随时得到测试和检验。采用交通管理系统可以从根本避免重大灾难事故的发生。

4 结论

总之,在长大隧道防灾方面国内有一些可以值得借鉴的先进技术,同时近年来,国际上广泛推行性能化防火设计,这一技术可以在具体防火目标上考虑技术

和经济的平衡,特别是可以考虑各种防灾手段之间的替代作用,具有十分广阔的应用前景,但在此方面我国起步较晚,在许多方面还是空白。在我国近二十年来对铁路隧道、公路隧道等进行了大量的科学研究,如铁道部 1992 年启动了“隧道消防技术的研究”的科技发展专项,组织了铁道部西南研究所、西南交通大学、铁道部第二设计院等有关单位重点研究了隧道的消防技术条件、设备、消防车辆、消防监测、以及消防灭火方法等内容,取得了许多可喜的成果。

由于隧道防灾和救灾是集技术、管理为一体的综合体系,所采取的技术措施与不同的隧道结构、不同地区的技术经济条件、救灾体系、管理水平等有着密切的关系,因此我们很难直接照搬国外的防灾技术方案。同时,隧道中一些防灾关键技术本身也没有取得实质性的突破,如长距离非水平隧道的防排烟理论问题、固定消防灭火的供水问题等都没有很好的解决;国外许多关于隧道内部的防灾关键技术也仍然是处于专利保护阶段,引进时也需要付出高昂的知识产权费用。因此无论从隧道本身的灾害防治需要还是从技术领域的突破来说,都需要对长大隧道的防灾技术进行科技攻关。

参考文献:

- [1] W. H. Park, D. H. Kim, H. C. Chang. Numerical predictions of smoke movement in a subway station under ventilation [J]. Tunneling and Underground Space Technology 21, 2006, 304.
- [2] 张伟,姜骅. 城市地下交通隧道火灾的防护[J]. 地下空间, 2002(3): 268 - 270.
- [3] 涂文轩. 我国铁路隧道消防技术的研究[J]. 消防技术与产品信息, 1997(10): 33 - 35.
- [4] 陈立道,王锦. 道路隧道火灾预防与控制研究[J]. 地下空间, 2003(1): 72 - 74.
- [5] 杨瑞新,陈雪峰. 高等级公路长隧道火灾特点及消防设计初探[J]. 消防科学与技术, 2002(5): 50 - 52.

(编辑 慕成娟)

作者: 赵运臣, 方正, ZHAO Yun-chen, FANG Zheng
作者单位: 赵运臣, ZHAO Yun-chen(中铁隧道集团有限公司, 河南, 洛阳, 471009), 方正, FANG Zheng(武汉大学, 武汉, 430027)
刊名: 铁道工程学报 
英文刊名: JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY
年, 卷(期): 2007, 24(3)
被引用次数: 3次

参考文献(5条)

1. W. H. Park; D. H. Kim; H. C. Chang [Numerical predictions of smoke movement in a subway station under ventilation](#)[外文期刊] 2006(3/4)
2. 张伟; 姜骅 城市地下交通隧道火灾的防护[期刊论文]-[地下空间](#) 2002(03)
3. 涂文轩 我国铁路隧道消防技术的研究 1997(10)
4. 陈立道; 王锦 道路隧道火灾预防与控制研究[期刊论文]-[地下空间](#) 2003(01)
5. 杨瑞新; 陈雪峰 高等级公路长隧道火灾特点及消防设计初探[期刊论文]-[消防科学与技术](#) 2002(05)

本文读者也读过(10条)

1. 管鸿浩 大瑶山隧道群防灾问题探讨[会议论文]-2005
2. 魏立新, 刘芳, 陈艳平, WEI Li-xin, LIU Fang, CHEN Yan-ping [广州市城市车行隧道建设技术现状及展望](#)[期刊论文]-[隧道建设](#) 2007, 27(2)
3. 汪洋 隧道火灾下衬砌结构安全性能研究[学位论文]2008
4. 唐琤琤 日本东京湾横断道路的隧道防灾系统[期刊论文]-[中国交通信息产业](#)2004(4)
5. 赵录学, ZHAO Lu-xue 长大隧道通风与防灾技术研究[期刊论文]-[隧道建设](#)2007, 27(z2)
6. 杜伟, 王安生 隧道防灾减灾措施的探讨[期刊论文]-[公路交通技术](#)2004(4)
7. 付修华, 杨其新, 刘化冰 秦岭特长公路隧道防火安全体系的探讨[期刊论文]-[广西交通科技](#)2003, 28(3)
8. 孙海富, SUN Hai-fu 石太客运专线长大隧道防灾救援设计研究[期刊论文]-[铁道工程学报](#)2009(10)
9. 赵占厂, Zhao Zhanchang 试论超长公路隧道建设中的几个关键技术问题[期刊论文]-[现代隧道技术](#)2009, 46(3)
10. 王立暖, 马志富, 杨贵生 铁路隧道防灾救援技术研究[期刊论文]-[铁道标准设计](#)2007(z1)

引证文献(3条)

1. 徐志胜, 黄益良, 李勇 火灾下隧道顶隔板植筋胶的安全性研究[期刊论文]-[消防科学与技术](#) 2008(10)
2. 张之启 南京地铁过江隧道通风系统方案研究[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2012(4)
3. 杨培中, 金先龙, 任中 隧道火灾数值仿真与应急响应研究[期刊论文]-[东华大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(3)

引用本文格式: 赵运臣, 方正, ZHAO Yun-chen, FANG Zheng 长大交通隧道防灾设计探讨[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2007(3)