

高海拔内燃牵引铁路隧道 运营通风技术研究

GAO HAIBA NEIRAN QIANYIN TIELU SUIDAO
YUNYING TONGFENG JISHU YANJIU

孙三祥 张云霞 ◎ 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高海拔内燃牵引铁路隧道 运营通风技术研究

孙三祥 张云霞 著

中国铁道出版社

2015年·北京

内 容 简 介

本书借鉴低海拔地区内燃牵引隧道运营已有成熟的经验,进行高海拔地区内燃牵引隧道运营通风设计参数、通风方案的研究,提出了高海拔内燃牵引隧道运营通风标准,进行了活塞风、隧道污染物模拟计算,为完善和提高内燃牵引条件下隧道运营通风的理论和实践水平奠定良好基础。

图书在版编目(CIP)数据

高海拔内燃牵引铁路隧道运营通风技术研究/孙三祥,
张云霞著. —北京:中国铁道出版社, 2015. 4
ISBN 978-7-113-20021-3

I. ①高… II. ①孙… ②张 III. ①高纬度地区—
铁路隧道—隧道通风—研究 IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 039032 号

书 名:高海拔内燃牵引铁路隧道运营通风技术研究
作 者:孙三祥 张云霞

策 划:曹艳芳
责任编辑:曹艳芳
封面设计:崔 欣
责任校对:孙 玫
责任印制:郭向伟

编辑部电话:010-51873017

电子邮箱:chengcheng0322@163.com

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京铭成印刷有限公司

版 次:2015年4月第1版 2015年4月第1次印刷

开 本:710 mm×1 000 mm 1/16 印张:12.5 字数:236 千

书 号:ISBN 978-7-113-20021-3

定 价:39.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

高海拔地区具有自然风速大,高温隧道热位差效应显著,内燃机车燃烧不完全,烟气排放浓度高等特点。借鉴低海拔地区内燃牵引隧道运营已有成熟的经验,进行高海拔地区内燃牵引隧道运营通风设计参数、通风方案的研究,将为完善和提高内燃牵引条件下隧道运营通风的理论和实践水平奠定良好基础。

该技术研究工作开始于2007年。基于对羊八井、关角、奎先等高海拔内燃牵引隧道内、外自然风速、风向、温度、湿度、大气压力以及列车通过时隧道内CO、NO_x、总固体颗粒物(TSP)、含氧量为期两天的监测,拉日线隧道隧址区大气温湿度、气压、自然风速、风向、含氧量为期三个月(4月~6月)的观测,确定了隧道内污染物扩散系数,参照相关文献,提出了高海拔内燃牵引隧道运营通风标准,进行了活塞风、隧道污染物模拟计算。分析了拉日铁路隧道2.0~4.0 km自然通风可行性,对隧道不同通风方案进行比较,提出了推荐方案。

为了与专业界同行共享研究成果,我们在《拉萨至日喀则铁路工程——高原区内燃牵引隧道通风技术研究报告》、《高岩温、高水温隧道施工热害防治及运营通风技术研究报告》的基础上,完成了此书。本书绪论,第一章二、三节,第二、四、八章由孙三祥编写;第一章一节,第三、六章由张云霞编写;第五、七章由余南阳、李炎、张云霞编写。全书由孙三祥统稿。

研究工作得到原铁道部科技开发计划项目(20070301)、中国铁建股份有限公司科技研究开发计划重点课题(2011-02A)的资助支持,中铁第一勘察设计院集团有限公司给予了大力支持,在此深表谢意。

本书引用了相关教材、著作及文章的相关内容,在此一并致谢。

真诚希望前辈、同行、读者对本书多提宝贵意见,以便纠正和改进。

作 者
2015年1月

目 录

绪 论	1
第一章 高海拔内燃牵引隧道运营通风环境影响因素及卫生标准	10
第一节 有害气体及其危害	10
第二节 高海拔地区环境对隧道污染物的影响	15
第三节 高海拔内燃牵引隧道运营通风标准	20
第二章 高海拔内燃牵引隧道内有害气体监测	29
第一节 有害气体浓度的监测方法	29
第二节 有害气体浓度的监测结果	31
第三章 高海拔内燃牵引隧道污染物扩散系数	42
第一节 污染物扩散基本方程	42
第二节 污染物扩散系数确定	42
第三节 隧道内污染物扩散系数比较	46
第四章 拉日线隧道外自然风速选取	49
第一节 拉日线隧道外自然风速观测	50
第二节 隧道内外自然风速关系	54
第三节 盆因拉隧道横通道对隧道内自然风速的影响	58
第五章 隧道活塞风计算	73
第一节 活塞风形成	73
第二节 活塞风基本理论	74
第三节 恒定流列车活塞风环隙流动速度分布	77

第四节 非恒定流列车活塞风环隙流动速度分布	83
第五节 活塞风风速不同计算方法比较	88
第六章 隧道内变速单列车非恒定流流场数值计算	95
第一节 计算模型	95
第二节 计算结果及验证	98
第三节 考虑壁面热流计算结果及分析	104
第四节 高海拔低气压对活塞风影响	109
第七章 高海拔内燃牵引隧道浓度场数值模拟	112
第一节 隧道内污染物浓度的数值计算	112
第二节 隧道自然通风条件下污染物浓度计算	116
第三节 隧道射流通风风机选型验算	128
第四节 竖井送排式通风三维数值模拟	131
第五节 隧道间污染物影响模拟	139
第八章 高海拔内燃牵引隧道运营通风方案	148
第一节 通风相关参数分析	148
第二节 2.0~4.0 km 隧道自然通风可行性	156
第三节 4.0~4.2 km 隧道运营通风方案	161
第四节 6.5~10 km 隧道运营通风方案	162
第五节 10 km 以上隧道运营通风方案	174
参考文献	188

绪 论

一、背 景

根据国内外长大隧道的工程实例和国内铁路隧道通风发展的技术现状,目前,对于内燃牵引的铁路隧道,从技术上解决低海拔地区长隧道的运营通风是可行的,要解决低海拔地区特长隧道的运营通风还有一定的困难。而且由于近年来电气化铁路的迅猛发展,内燃牵引的隧道运营通风问题未得到很好解决。

对于高海拔地区内燃牵引的长隧道以及特长隧道运营通风的研究仍处于起步阶段,已建成的内燃牵引的高原隧道基本以洞口帘幕式通风为主,在一定程度上解决了隧道内的污染问题。高海拔地区特殊的地理环境和气候条件对现有机车车辆的要求已超出相关现行技术标准范围,目前高海拔地区长隧道通风设计所建立的模型和计算模式是按内地平原地区考虑的,获得的数据并不符合高海拔地区。

青藏铁路使用的部分机车是美国制造的 NJ₂ 型内燃机车,燃料采用柴油,格拉线客货两用 DF_{4B} 型内燃机车数量最多。拉萨至日喀则铁路线是青藏铁路的首条延伸线,共设 29 座隧道,拉日线平均海拔高程 3 800 m,该线路设计为内燃机车牵引,长度大于 3 km 的隧道有 10 座。其中,最长的隧道为 10.41 km,而目前国内最长的内燃牵引铁路隧道不超过 8 km,采用铁路隧道成熟的通风方式不能很好地解决该隧道的运营通风问题。

借鉴低海拔地区内燃牵引隧道运营已有较为成熟的经验,根据高海拔地区自然风速大,高温隧道热位差效应,内燃机车燃烧不完全,烟气浓度高等特殊性,进行高海拔地区内燃牵引隧道运营通风设计影响参数、通风方案研究,为通风方式的选择提供充分资料,为相关技术标准的制定提供可靠的依据,从而在理论和实践上完善和提高内燃牵引条件下隧道运营通风的应用水平。

2007 年 4 月~6 月,中铁第一勘察设计院集团有限公司委托兰州交通大学进行了拉萨至日喀则铁路工程隧道通风方案研究及环境背景值观测。先后对羊八井、关角、奎先隧道内外自然风速、风向、温度、湿度、大气压力以及每列火车通过后隧道内 CO、NO_x、总固体颗粒物(TSP)、含氧量分别进行了为期两天的监测,对拉日线长隧道隧址区大气温度、湿度、气压、自然风速、风向、含氧量等进行了为期三个月(4 月~6 月)的观测。在此工作基础上,会同西南交通大学进行了自然风影响下活塞风风速

及活塞风长度的计算。分析研究了拉日铁路隧道长度 2~4 km 及 4~4.2 km 运营通风方式,6.5~10 km(及大于 10 km)隧道不同通风方案比较,提出了推荐方案,并确定了相关计算参数。

研究工作中,基于隧道施工通风观测资料,分析了热位压作用对隧道内自然风的影响、隧址区自然风对隧道内自然风的影响,确定拉日隧道自然风取值。建议隧道正式运营后进行隧道内外自然风风速、列车通过隧道时污染物时空分布特征监测。同时对大气温度、湿度、气压、含氧量进行观测。

二、国内外现状

1. 国内既有内燃牵引隧道通风效果

(1) 奎先隧道

南疆线吐鲁番至库尔乐段的奎先隧道长 6 152 m,坡顶标高 2 984.9 m,两洞口高差 49.7 m。隧道内为人字坡,最大坡度为 13.5‰,采用东风 4 型内燃机车双机牵引,装配高原增压器,运营通风采用机械式洞口帘幕自控通风(现为纵向式射流通风)。在 1984 年 9 月由乌鲁木齐铁路局和铁一院共同主持对洞口机械帘幕和通风设备进行通风工况及劳卫测试:双机牵引车尾通过测点时,有害气体 NO_x 最高浓度为 92.8 mg/m^3 ,CO 为 87.5 mg/m^3 ,主机室在关闭车窗情况下,室内未测得 NO_x 和 CO,辅机室直接受主机排烟的污染,列车在上坡(13.5‰)时,逸入室内机车 NO_x 为 $13.1 \sim 13.8 \text{ mg/m}^3$,CO 为 13.8 mg/m^3 ,列车尾部守车污染严重,因门窗密封性差,主辅机的烟气逸入守车内较多, NO_x 达到 30.4 mg/m^3 。2002 年 7 月在奎先隧道发生人员中毒事故,其主要原因是列车在洞内持续低速运行,柴油机废气浓度过高,空气质量达不到机车工作要求,导致柴油机不能正常燃烧,不能保持机车规定的功率。2007 年 4 月兰州交通大学对奎先隧道机械通风效果监测结果表明,机械通风条件下,列车驶出隧道 11 min 后 NO_x 、CO、TSP 浓度达标。

(2) 老关角隧道、羊八井 I 号隧道

老关角隧道全长 4 010 m,洞内最高处路肩设计高程为 3 690 m。洞身全部在直线上,隧道线路纵坡除进口 430 m 长度为 2‰上坡外,其余坡段沿出口方向为 4‰和 8‰的连续下坡,两端洞口高差 17.62 m。1987 年将喷嘴式通风改为洞口风幕式风道通风。通风系统由风道、通风风机、风幕系统和控制系统等部分组成,系统设在隧道的出口端。通风方式为上行列车车尾出洞后进行纵向吹入式机械通风。

羊八井 I 号隧道全长 3 345 m,海拔 4 264 m,距拉萨 80 km,是青藏铁路上唯一要安装通风系统的隧道。在设计中采用全纵向射流式通风。2007 年 3 月,两次对老关角隧道、羊八井 I 号隧道运营通风现场监测,结果表明:在自然通风条件下,列车通过隧道后 15 min, NO_x 、CO 浓度均可达标。

(3) 分水关隧道

分水关隧道是横(峰)南(平)铁路穿越武夷山脉的长大越岭隧道,全长 7 252 m。隧道 1993 年开工建设,1996 年建成。近期内燃机车牵引,远期电气化。运营通风风道设于进口端线路前进方向左侧,风道长度 46 m。根据列车在洞内运行时速(上坡) 22 km,允许通风时间 8.85 min 等要求,原设计采用洞口风道吹入式通风和射流通风相结合的方案。后来在运营实践中,发现近期安装 28 台射流风机进行射流纵向通风即可满足初、近期行车对数需要,故该隧道运营通风采用全射流通风方案,现场测试表明,通风效果可达到近期设计要求。

(4) 彭莫山隧道

焦柳线牙屯堡——水团站之间彭莫山隧道全长 5 592 m,平面为直线,下行方向 0~971 m 为 1‰的上坡,971~5 528 m 和 5 528 m 至出口分别为 9‰和 8.3‰的连续下坡。隧道行车密度为 22~26 对/日,上行为内燃机车双机牵引,吨位数 2 061~3 500 t,隧道内通行速度 34~42 km/h。现为 2 台 95 kW 轴流风机和 10 台 15 kW 射流风机,一台 500 kV·A(10 kV/0.4 kV)变压器。采用提前通风方案:上行列车车尾入洞后 1 min,启动 10 台射流风机及 1 台轴流风机。正常通风方案为上行列车车尾入洞后 6 min,启动 10 台射流风机及 2 台轴流风机。

柳州铁路局环境监测站 2004 年监测结果表明:

①自然通风工况,上行方向为 8.3‰~9‰的连续上坡,双机牵引,车速低,有害气体超标。隧道内有害气体浓度、排出时间与上行机车牵引重量吨位数、车速成正比,即牵引重量越重,车速越慢,则隧道内有害气体浓度越高,通风效果就越差,有害气体排出所需的时间就越长。在自然通风工况下,隧道内通风效果差。

②提前通风工况,2 列上行货车通风达标时间为 11~15 min,CO 指标符合部标标准,但 15 min 加权平均浓度 NO_x 指标超标,需增大机械通风风量,延长通风时间。

③正常通风工况,15 min 加权平均浓度 CO、 NO_x 均达标,最佳通风时间为 9~14 min。

4~6 月是南方雨季天气,气压低,空气潮湿,而且隧道内湿度大,这些因素也影响着隧道内有害气体的排出。测试期间,在自然通风工况下,有害气体从隧道口排出时间可长达 20~30 min。

(5) 荒沟隧道、南山隧道

东北东部铁路通道白河至和龙线荒沟隧道和南山隧道,海拔为 831~854.19 m 和 749.84~821.72 m,坡度为 0.35‰和 0.95‰,正线数目为单线,限制坡度为 1.45‰,隧道长分别为 6 610 m 和 7 566 m,内燃牵引,牵引质量近期 1 500 t,远期双机 3 000 t。

通风设计为上坡单方向进行通风控制,由帘幕(10 台 15 kW 射流风机)、4 台

132 kW通风机组成的三级控制(手动控制级别、PLC 自动控制级别和智能控制级别)的通风系统。荒沟隧道距进洞口 70 m 和 143 m 处有 53 m 和 107 m 长 2 个通风洞,通风洞断面 14.6 m^2 ;南山隧道距进洞口 70 m 和 140 m 处有 65 m 和 117 m 长 2 个通风洞,通风洞断面 14.6 m^2 ,每个通风洞内分别安装 2 台通风机。测试时,列车尾部进洞后 20 s 分别开启每个通风洞内的 1 台通风机。

吉林铁路疾病预防控制中心于 2009 年 2 月 20 日~23 日对荒沟隧道和南山隧道通风装置排烟除尘效果进行了测试,结果表明:

荒沟隧道达到排烟除尘效果的最佳通风时间为 25 min,所测定的各项卫生学指标可降低到本底值或接近本底值;由于南山隧道坡度大、隧道长,达到排烟除尘效果的最佳通风时间为 33 min,所测定的各项卫生学指标可降低到本底值或接近本底值。

(6)江底坳等隧道

怀化铁路卫生防疫站于 1994 年 7 月对张家界至怀化南站区段 DF₄ 型内燃机车双机牵引通过长隧道群时的劳动环境影响进行了实验研究。区段长短隧道 151 座,坡度 0.2%~1.2%。2 km 以上隧道 8 座,最长 4 338 m。隧道累计总长度 93.4 km。张家界机务段 DF₄ 型内燃机车功率 1 950 kW,单机牵引吨位 1 500~1 600 t,双机牵引试验车 3 150 t。隧道内有害气体浓度较单机牵引增大 4 倍,且严重超标。双机牵引试验车室有害气体浓度大部分超标。江底坳等隧道内单机牵引列车通过后,有害气体浓度超标。如果该区间实施 DF₄ 型内燃机车双机牵引扩能,建议逐步分期对上述几座主要长隧道采用机械通风。

(7)梨树沟隧道

2006 年,北京交通大学针对铁路内燃机车对北京密云县梨树沟隧道 NO₂ 和 TSP 浓度的采样分析,其中 NO₂ 浓度日平均值 0.11 mg/m^3 (最大日平均值 0.13 mg/m^3 ,最小日平均值 0.10 mg/m^3),TSP 浓度日平均值 0.31 mg/m^3 (最大日平均值 0.38 mg/m^3 ,最小日平均值 0.26 mg/m^3),均超过国家环境空气质量二级标准。而铁路内燃机车作为主要的污染排放源,对 NO 和 TSP 浓度的贡献不容忽视。同时,通过富集因子法对颗粒物中的元素组分分析也进一步证实,内燃机车的燃油排放又造成了 S、Zn 元素在所采集颗粒物中的明显富集。

2. 铁路隧道机械通风方式

根据现行的《铁路隧道运营通风设计规范》(TB 10068—2010)的有关规定,对于内燃机车牵引、长度在 2 km 以上的单线隧道宜设置机械通风。

迄今全国已完成运营通风设计的铁路隧道,其中大部分为无帘幕洞口风道式,而在一些长隧道中通过技术经济比选,采用了帘幕式洞口风道通风,其消耗的动力较少;在一定程度上解决了洞内的污染问题,但目前大部分被全纵向射流式通风代替。而竖井式和斜井式辅助坑道分段通风方式一般系结合施工使用的竖井和斜井用作风

道,采用得较少,尤其是不采用机械通风而利用竖井加强自然通风的隧道,基本上是不成功的。

综合国外的经验来看,内燃牵引的长隧道通风问题已经有行之有效的解决方法,萨卡托喷嘴式通风是较早采用的机械通风形式,其结构简单。但对长大隧道由于该种通风方式风机动力消耗较大,实际效果也不甚理想,后即被辅助坑道分段式通风和自动监控的帘幕洞口风道式机械通风所代替。这些比较复杂的通风系统要求有完善可靠的通风监控系统才能保证通风系统安全和正常运营,同时帘幕也由新型的脆性材料制成,即使在通风监控系统失效的情况下,列车也可以直接穿帘幕而过。这些成熟的经验对我国的内燃牵引隧道运营通风设计有着很好的借鉴意义。目前我国内燃牵引的铁路隧道尚未有成功的采用竖井(斜井)分段式机械通风系统的实例。

进入 20 世纪 90 年代以来,随着国内射流通风机生产工艺的成熟及其控制技术的完善,射流通风方式愈来愈广泛地应用在铁路隧道中。采用射流通风可充分利用列车活塞风、易于实现双向通风、气流组织明确、风量控制容易且较准确。射流风机与常用的轴流风机相比,其构造、功率和所引起的土建工程等方面都有着独特的优点,无论是单独使用还是配合轴流风机使用,都取得了较理想的效果。对于长大隧道,由于风机台数多,管理维护有困难。但射流通风设计如何才能做到经济合理,值得研究和探讨。

2010 年,东北地区铁路白河至和龙段南山单线长大隧道内燃牵引通风方案中取消机械帘幕,改由风帘幕代替机械帘幕,解决以往影响行车安全的问题。根据计算,风帘幕压力值取 2~3 倍用射流风机的压力,在左右两侧布置,经喷嘴将风喷出形成风幕帘。射流风机风量可根据隧道断面积控制速度 $3.5\sim 5.0\text{ m/s}$ 确定,通过现场观察测试,使用效良好,满足使用要求。

分水关隧道分别作了有帘幕洞口风道吹入式(列车出洞关帘幕吹风、车尾进洞关帘幕提前吹风)通风方案,无帘幕洞口风道吹入式(列车车尾出洞开风机吹风、列车进洞顺列车提前吹风)通风方案以及射流纵向式全射流纵向通风、全射流提前通风、射流加洞口风道式通风方案。是对 7 km 以上长隧道(不设帘幕)运营通风的新尝试和探索,在我国尚属首次。运营实践表明近期安装 28 台射流风机采用全射流通风方案即可满足初、近期数需要。

在一些山区铁路中,受线路条件限制需要采用内燃机车双机牵引,而在一些长大隧道中,双机牵引的后续机车往往会吸入前方机车排出的废气,从而使内燃机车燃烧不充分,更主要的是造成机车内部过热,使机车功率下降甚至在隧道中出现停机现象。根据调查,在我国内燃牵引的长隧道中,双机牵引的列车在通过隧道约 4 km 后很容易发生这种现象,因此在长隧道运营通风设计时,必须将机车降热通风和排出废气一并考虑,而前馈式通风则是解决问题的有效方法。这是铁路隧道运营通风的一

个新课题,有待于进一步的深入研究和设计实践。

1997年,卢传福提出了隧道运营通风“同步跟踪”的新概念,介绍了“同步跟踪射流通风”的隧道通风方式。提出了“进洞通风、风随车走、车出气除”的新观念和新的隧道通风方式。同年,铁道部第二勘察设计院的曾满元、张开鑫在电气化铁路隧道中提出了移动式运营通风的概念,但同时指出,对于牵引动力为蒸汽、内燃机车的铁路隧道,污染源主要为蒸汽及内燃机车排放的有害气体,隧道内空气污染较重,每通过一趟上坡列车都需要通风,通风的频率高,适合采用固定式运营通风系统。

20世纪中叶,欧洲各国的铁路网已基本形成,在铁路隧道通风方面并无多大发展。随着铁路运输量的增加,机车类型开始采用牵引力大的电力机车。

而在北美地区,由于牵引动力一度由电力改为内燃,曾对内燃机车牵引的隧道通风问题进行过一些研究。如美国 Hoosac 隧道(7 645 m)1946年由电力牵引改为内燃牵引时,研究了兼顾排除烟气与解决机车超热的通风方案,采用了洞口风道式机械通风,配置有自动遥控启闭的帘幕装置;加拿大内燃牵引的 Mount Macdonald 隧道(14.5 km)是北美地区最长的单线隧道,该隧道采用了复杂的竖井分段式通风系统,隧道进口和中部设置有通风帘幕,利用隧道中部的通风竖井,根据列车在隧道内的不同位置,通过通风监控系统综合控制帘幕的开闭和风机的运转,满足了机车降热和排除烟气的通风要求。与 Mount Macdonald 隧道相邻的 Mount Shaughnessy 隧道长约 1.86 km,该隧道采用了 20 台射流风机来解决隧道内机车降热通风问题。

3. 相关技术研究

(1) 列车活塞风

列车活塞风作为隧道通风的一个重要基础研究,还需要深入细致的研究成果且尚待完善,离达到实际应用仍有距离。1990年前,北京交通大学荣深涛教授领导的课题组对列车通过隧道的空气阻力进行了较多的研究。1996年,在新龙门隧道的通风计算中,西南交通大学赵海恒、冯炼等人采用了非恒定流理论,并对活塞风和污染物沿隧道浓度分布进行了数值模拟。2010年,于连广引入了宏观动量守恒定律,建立了一种新型非恒定流活塞风一维解析方程,修正了常规一维解析方程物理意义不明确的缺陷,解析方法具有较高的精度。

1999年,王伟等建立了高速列车在隧道中不同位置处行驶时,以及反映竖井和会车影响的非恒定流列车活塞风计算式。2006年,贺江波等运用不同位置处行驶时非恒定流活塞风计算公式,通过 MATLAB 软件数值求解活塞风速。

2010年李炎等从运动列车与隧道气流的功能转换出发,以列车作用段作为活塞风压源,利用流体力学的基本原理、基本方程和湍流半经验理论,提出了活塞风压力和速度的计算方法。以现场实车的隧道空气动力学试验资料为参照进行对比,活塞风速度的计算值与实测符合度较好,这表明以不可压缩定常流动为计算模型的活塞

风简化计算方法可为活塞风的工程实际应用提供理论基础。

2013 年史宪明采用一维非定常可压缩流动模型和特征线法,建立了列车通过高速铁路隧道时产生的活塞风的计算方法,并将该方法与国外学者模型试验数据及常规一维非定常不可压缩流动模型计算结果进行对比,证明其有较高的精度。得出对活塞风的影响程度从大到小分别为列车速度、阻塞比、列车长度和隧道长度。

(2) 空气阻力计算

1999 年,王韦等在经典的原朝茂公式基础上,对有竖井和会车工况下的高速列车的空气阻力进行了解析计算。

2010 年史宪明等对单列车通过无辅助坑道长大铁路隧道时的空气阻力计算方法进行探讨,建立基于非恒定流和车头车尾压差的空气阻力计算公式,在通过现场试验对此方法进行验证后进行大量工况的计算,分析得出影响隧道内列车空气阻力最主要的因素是列车速度,其次分别为阻塞比、隧道和列车长度。

2012 年,史宪明提出了长大铁路隧道列车相向及同向运行时空气阻力的理论计算公式,并相应得出了空气阻力的一般规律。田峰等根据黏性流体力学的非稳定流理论,提出了在自然风速影响下列车相会以及减速相会时的活塞风速计算方法,认为列车活塞效应的影响因素主要有隧道净空尺寸、自然风速和阻塞比。李炎根据相对运动原理,采用一维不可压缩稳态流动模型导出车头绕流阻力系数的基本关系,认为车头压力损失系数体现列车自身的特性,车头绕流阻力系数体现隧道中列车的运行特性。

陈荣等利用计算流体动力学软件 Star-CD,建立了列车通过隧道时的二维动网格模型,模拟在不同车速下,隧道内活塞风和压力场的动态变化规律,并比较不同外形和运行速度时列车所受到的空气阻力。模拟结果表明:列车通过隧道时的运行速度越大,产生的活塞风风速越大,相对压力越大,列车所受的空气阻力越大;列车通过隧道内某一测量点时,活塞风风速会发生突降,活塞风最大风速在列车尾流中形成;车头到达隧道入口时,最大压力突增,并很快达到最大值,随后逐渐减小;车尾到达隧道入口时,车尾最小压力突降;车身在隧道内时,车尾的最小压力波动较小;流线型列车所受的空气阻力约为钝形列车的 0.5~0.7 倍。

(3) 隧道污染物扩散

隧道污染物扩散规律研究是国外近十年针对铁路隧道运营通风方面的研究主要内容之一。研究方法大多采用理论分析、数值模拟计算,实地测量较少。所采用的计算软件也各有不同,如 AIRPAK、ANSYS CFX、FDS、FLUENT、OPENFOAM、COMOSAL、SES、STARCD 等。采用的运营通风方式大部分考虑了消防应急疏散,在后来发展的通风系统研究中增加了静电除尘器的应用,用以过滤机车排放污染物。针对隧道内除尘和有机气体的净化方面,挪威、日本等国家研究工作起步较早,这些

国家在多条运营隧道中采用了静电除尘器、二氧化碳净化器等废气净化设备。

20 世纪 60 年代,随着双线隧道和内燃牵引盛行,隧道内的防排烟问题和活塞风的应用开始得到进一步发展。日本的酒井恒美对北陆隧道(13 871 m,双线)进行了现场实地测量,通过实验数据分析,得出了隧道内以及司机室和车厢内有害气体的分布规律,并论述了污染物浓度对人体健康的影响。日本福地合一在 1978 年提出了隧道内的活塞风和污染物浓度计算的一维非恒定流方法。

W. K. Chow 对隧道内纵向通风时烟气特征进行了研究,并对香港地区隧道通风和火灾时污染物 CO 、 NO_x 等的控制标准进行了分析。

J. Modic 利用数学模型计算了不同风速下隧道内 NO_x 、 CO 和烟尘的污染物浓度随空间分布规律,提出了自然通风和机械通风的分界线。

Robert Gehriga 等对列车穿过隧道时产生的烟尘、 PM_{10} 、铁、锰、铜等物质尺寸、分布等规律进行了研究,A. D. Ferreira 采用风洞试验,对运煤货车通过隧道时产生的扬尘进行了实验研究。

1997 年,冯炼提出了按具有运动污染物一维非恒定流模型计算隧道内气流速度和污染物浓度分布的方法,并对新龙门隧道进行了数值模拟,阐述了内燃机产生的有害气体的危害及组成成分,并按牵引功率计算出排污量,分析了影响污染物浓度分布的各种因素。对列车在洞内交会地点、射流风机工作时间及风机的送风方向进行了综合比较,提出最有利工况和最佳通风方式。

2012 年,陈文艺根据大气扩散方程建立了铁路隧道内空气污染物浓度分布模式,采用有限体积法求解,结果表明内燃机车污染物排放源强和隧道内风速是影响铁路隧道内空气污染物浓度分布的关键因素,初始浓度和边界浓度的影响也较为显著,扩散系数的影响很小,在有风的情况下可以忽略。针对青藏铁路羊八井一号隧道进行模拟,结果表明隧道内 NO_x 浓度最大值出现在机车车头所在的位置,最大浓度为 15.02 mg/m^3 。

随着计算机的快速发展,研究人员对隧道通风的研究多专注于数值模拟方面,通过建立数学模型,可以对列车活塞风、隧道污染物扩散特性以及隧道机械通风系统进行研究。

三、研究内容

针对青藏铁路特殊气候条件内燃牵引机车通过隧道时的运营通风问题,研究工作主要包括以下几部分:

1)通过对国内外内燃牵引机车隧道内污染物浓度控制标准比较以及拉日线现场气候对污染物浓度的影响,提出高海拔隧道内燃牵引运营通风时隧道内空气的控制标准建议值。

2)通过对羊八井 I 号隧道、老关角隧道和奎先隧道内有害气体现场监测,分析高原气候条件下隧道内污染物随时间和空间的迁移规律,通过求解污染物扩散方程,分析隧道内污染物扩散规律。

3)通过对拉日铁路隧址处现场环境背景值的实测,分析隧道内、外自然风速等环境背景值对隧道运营通风的影响,探讨高海拔隧道自然通风的界限。

4)利用 ANSYS FLOTTRAN 中动网格生成技术,建立空气流动的控制方程,对单列车在隧道内恒速运行时产生的活塞风进行数值模拟,分析活塞风环隙流场分布特性,并对计算结果进行验证。

5)利用 CFX 中动网格生成技术,对单列车在隧道内加速、恒速、减速运行时的速度场、压力场进行分析验证。在此基础上进一步研究壁面热流及高海拔低气压对隧道内速度场、压力场及温度场的影响。

6)利用一维非恒定流软件,模拟隧道内气流速度和污染物浓度的时空分布,分析机械通风的隧道长度、利用辅助坑道进行分段式通风方案的可行性以及机械通风设备配置的合理性。利用商业 CFD 模拟软件(STAR-CD),建立竖井(斜井)送排式通风的三维模型,模拟不同短道长度,不同排风量、不同送、排风道与隧道轴线夹角等工况下隧道内速度场和压力场,模拟分析相邻两隧道洞口间污染物的相互影响。

7)进行了不同岩石温度情况下通风降温计算,得出了隧道内壁气温降至 28°C ,不同通风时间对应的需风量及功率,并提出了隧道运营期热湿环境控制相关建议。

8)进行高海拔、内燃牵引特长(长)隧道运营通风方案研究。

第一章 高海拔内燃牵引隧道运营通风 环境影响因素及卫生标准

铁路隧道运营通风的目的是把隧道内有害气体浓度降到规定的标准以下,确保列车乘务人员、旅客和隧道作业人员身心健康,减少有害气体、湿度、高温等对隧道衬砌及有关设备的腐蚀和影响。目前高海拔地区部分铁路依旧采用内燃牵引,低气压、缺氧、大风等特殊的气候条件对隧道运营通风的影响,没有现行的相关技术标准可参考,因此,有必要对高海拔气候条件下隧道运营通风的环境影响因素及卫生标准进行分析。

内燃机车排出的烟气成分很复杂,在不同工况下工作,排出的烟气会有很大不同,主要是柴油在高温、高压下进行燃烧时产生各种成分的混合体。内燃机车烟气中主要有害成分有氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO_2)、二氧化硫(SO_2)、含氧碳氢化合物(如甲醛、乙醛)以及未燃烧充分的燃料微粒所形成的烟类等。空气中污染物的浓度一般用每立方米被污染的大气中含有多少毫克污染物(mg/m^3)表示。有时也用百万分体积浓度(ppm)计量。1 ppm 是指在常温常压下,1 m^3 被污染的空气中含有 10^{-6} m^3 有害气体,即按体积计的浓度为百万分之一。1 克分子(摩尔)气体在常温常压(25 $^{\circ}\text{C}$, 760 毫米水银柱)下占有 24.45 L 的体积,因此 ppm 和 mg/m^3 之间的单位换算关系为

$$1 \text{ ppm} = \frac{M}{24.45} \text{ mg}/\text{m}^3 \quad (1.1)$$

式中 M ——该气体的分子量。

第一节 有害气体及其危害

一、氮氧化物(NO_x)

氮氧化物包括多种化合物,如氧化亚氮(N_2O)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO_2)、三氧化二氮(N_2O_3)、四氧化二氮(N_2O_4)和五氧化二氮(N_2O_5)等。除二氧化氮以外,其他氮氧化物均极不稳定,遇光、湿或热会变成二氧化氮及一氧化氮,一氧化氮又变为二氧化氮。因此,职业环境中接触的是几种气体混合物,常称为硝烟(气),

主要为氧化氮和二氧化氮,并以二氧化氮为主。其中,氧化氮(NO)为无色气体,分子量 30.01,熔点 -163.6°C ,沸点 -151.5°C ,蒸气压 101.31 kPa(-151.7°C),溶于乙醇、二硫化碳,微溶于水和硫酸,水中溶解度 4.7%(20 $^{\circ}\text{C}$),性质不稳定,在空气中易氧化成二氧化氮($2\text{NO}+\text{O}_2\rightarrow 2\text{NO}_2$)。二氧化氮(NO_2)在 21.1 $^{\circ}\text{C}$ 时为红棕色刺鼻气体,在 21.1 $^{\circ}\text{C}$ 以下时呈暗褐色液体,在 -11°C 以下温度时为无色固体,加压液体为四氧化二氮,分子量 46.01,熔点 -11.2°C ,沸点 21.2 $^{\circ}\text{C}$,蒸气压 101.31 kPa(21 $^{\circ}\text{C}$),溶于碱、二硫化碳和氯仿,微溶于水,性质较稳定。

氮氧化物对上呼吸道的刺激作用较小,而易于侵入呼吸道深部细支气管和肺泡,对呼吸系统可引起多种多样的损伤作用,包括对呼吸道组织学损伤、肺免疫功能下降以及肺功能的改变等等。此外,氮氧化物还可对中枢神经系统、心血管系统等产生危害作用。

特别的对于职业接触中的主要氮氧化物二氧化氮,据有关资料介绍,当其在空气中的浓度达到 0.004%(19.5 mg/m^3)时,2~4 h 就会引起中毒;当浓度达到 0.006%(29.2 mg/m^3)时,会引起咳嗽、胸部发痛;当浓度达到 0.01%(48.7 mg/m^3)时,短时间内对呼吸器官就有很强烈刺激作用,咳嗽、呕吐、神经麻木;当浓度达到 0.025%(121.7 mg/m^3)时,可很快使人窒息死亡。

此外,同一氧化碳等有毒气体相比,二氧化氮更加危险,主要表现在二氧化氮中毒后有较强的潜伏期,初期没有感觉(经过 4~12 h,甚至 24 h 以后才发生中毒征兆),即使在危险的浓度下,初期也只是感觉呼吸道受刺激,开始咳嗽吐黄痰,呼吸困难,但很快就会面临死亡。不同浓度二氧化氮对人体的影响见表 1.1。

表 1.1 二氧化氮对人体的影响

NO ₂ 浓度		主要症状
(mg/m^3)	(ppm)	
10	5	闻到强烈臭味
20~51	10~25	对耳、鼻、喉有刺激
103	50	1 min 时引起呼吸不畅
164	80	3~5 min 时引起胸疼
>411	>200	瞬时暴露时,有生命危险或死亡

二、一氧化碳(CO)

一氧化碳为无色、无味、无刺激性的气体,分子量为 28,密度为 1.25 kg/m^3 ,熔点 -205°C ,沸点 -191°C ,在水中的溶解度很低,但易溶于氨水。一氧化碳性极毒,当经呼吸道进入肺泡,被吸入血液后,能与血红蛋白(Hemoglobin)结合成碳氧血红蛋白