文章编号：1671-6612（2019）06-664-05

一种节能的环形隧道通风装置

李若溶　狄育慧　蒋　靖

（西安工程大学城市规划与市政工程学院　西安　710048）

【摘　要】　环形隧道由于其特殊的构造，不利于污染物的排放和消散，隧道通风方式的选择至关重要。在总结国内外对隧道通风方式研究的基础上，分析总结环形隧道的特点，并提出一种太阳能隧道通风系统，提高空气净化以及能源利用率，可以在一定条件下节约能耗，给隧道带来良好的通风效果；进一步探讨了环形隧道不同的节能措施，为地下环形隧道的通风节能提供一定参考。

【关键词】　隧道通风；节能；环形隧道；能源；污染物

中图分类号　U459.2　　文献标识码　A

Energy-saving Annular Tunnel Ventilation Device

Li Ruorong　Di Yuhui　Jiang Jing

(School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048)

【**Abstract**】　Due to its special structure,the choice of tunnel ventilation mode is very important.the circular tunnel is not conducive to the discharge and dissipation of pollutants. Based on the summary of research on tunnel ventilation methods at home and abroad, this paper analyzes and summarizes the characteristics of circular tunnels, and proposes a solar tunnel ventilation system to improve air purification and energy utilization. It can save energy under certain conditions and bring good ventilation effect to the tunnel. The different energy-saving measures of the circular tunnel are further discussed, which provides a reference for the ventilation and energy saving of the underground circular tunnel.

【**Keywords**】　Tunnel ventilation; Energy saving; Annular tunnel; Energy; Contaminants

0　引言

近年来，随着城市化水平的不断加快，给我国带来巨大活力的同时，也给城市环境带来很多困境。城市化水平的升高造成城市道路面积减少，同时路网建设和交通设施滞后引起的交通拥堵问题已成为我国突出问题。为了减缓交通拥堵问题，开始发展城市地下交通系统，城市环形隧道就是一种新型的地下交通形式[1]。

城市环形隧道虽然是解决交通拥堵的重要方式，但由于其在结构上为相对封闭的空间，不利于污染物的迁移和消散[2]，而近年来随着机动车经济的飞速发展，机动车的生产和使用量急剧增长，机动车排气对环境的污染日趋严重，许多大城市的空气污染已由燃煤型污染转向燃煤和机动车混合型污染，机动车排气污染对环境和人们身体健康的危害已相当严重。而创造一个空气良好的环境也是建设现代化文明城市的标志，是环境保护工作的当务之急，解决机动车尾气污染问题已经迫在眉睫。根据生态环境部近日发布《中国机动车环境管理年报（2018）》年报统计，我国机动车保有量持续增长。2017 年，全国机动车保有量达到 3.10 亿辆，同比增长 5.1%，2017 年，全国机动车四项污染物排放总量初步核算为 4359.7 万吨，其中，一氧化碳（CO）3327.3 万吨，碳氢化合物（HC）407.1 万吨，氮氧

作者简介：李若溶（1994.11-），女，在读研究生，E-mail：418460440@qq.com
通讯作者：狄育慧（1964-），女，教授，E-mail：470836165@qq.com
收稿日期：2019-06-18

化物（NOx）574.3 万吨，颗粒物（PM）50.9 万吨。机动车是大气污染排放的主要贡献者，其排放的 CO 和 HC 超过 80%，NOx 和 PM 超过 90%。所以，城市隧道建设所带来的环境问题不容忽视。当前城市隧道污染物排放量是否达到标准还有待验证，当下其所面临的主要问题就是隧道内废气的排放问题[4]，所以通风方式的选择至关重要。

本文在总结国内外对隧道通风方式研究的基础上，对比分析环形隧道与长直隧道的不同，根据环形隧道的特点，提出一种太阳能隧道通风系统，使其更好的应用于环形隧道通风系统中，可以最大程度减少给隧道人员造成的伤害。并提出适合于环形隧道的节能措施，对于减少通风系统能耗，对未来城市公路环形隧道的设计及工程造价提供有力的依据，对以后的环形隧道相关研究也提供有力的借鉴。对于减少营运费用，提高隧道空气质量品质，加快设计速度，形成规范化的设计体系具有重要意义。

1　隧道通风的研究应用状况

国内外很多专家学者对隧道通风问题进行实验研究。国外对隧道污染物分布及通风方式的研究状况起步比较早，美国在 1919 年研究纽约市荷兰隧道（2610m）时，开始研究隧道内汽车排放的 CO 标准问题，国内最早是由西安交通大学在 1986 年对机动车尾气排放的污染物进行研究，得出了几种主要的污染物。随后，大量的专家学者对隧道通风情况展开研究。Chan-Hoon Yoon 等采用热力学分析原理研究了长大隧道纵向通风系统中通风竖井对隧道内自然风压的影响[3]。Jaroslav Katolicky 运用欧拉—拉格朗日模型并模拟公路隧道内车辆的运动及其对运行通风的影响并得到了通过移动车辆产生的流量作为交通速度和交通率的函数[4]。陈建涛等人从二阶偏微分方程表示的隧道通风污染模型中推导出了动态预测隧道出口空气污染物浓度的线性迭代方程,对方程中新出现的变量提出了可行的计算方法[5]。陈外才，陈林翼分析热位差对单向单竖井公路隧道冬季通风的影响规律，优化单向单竖井公路隧道冬季通风模式[6]。

目前，隧道通风方式主要分为自然通风和机械通风两类，机械通风又分为全横向通风、半横向通风、纵向通风和混合通风方式[7]。对于双向交通隧道，当 $L\times N\geqq 6\times 10^5$ 时，应设置机械通风；对于单向交通隧道，当 $L\times N\geqq 2\times 10^5$ 时，应设置机械通风[8]。其中：L 为隧道长度，m；N 为交通辆，辆/时。近年来国内外各类隧道采用的通风方式[9-11]如表 1 所示。

表 1　国内外隧道通风方式

Table 1　tunnel ventilation mode at home and abroad

序号	隧道名称	地点	隧道长度（m）	修建年份	通风方式
1	Galerie DormagenA57	德国	690	2014	自然通风
2	Tunnel Confignon	瑞士	1480	2014	纵向通风
3	Tunnel du Fréjus	法国	12870	2013	横向通风
	英吉利海峡隧道	英法	51000	1994	纵向+竖井
4	Freiburg Stadttunnel	德国	2520	2012	纵向
5	Folgefonn	挪威	11100	2001	纵向通风
6	关越	日本	11020	1989	纵向通风
7	Riederwald	德国	1100	2011	纵向通风
8	奥林匹克公园环隧	北京	主（5500）+支（1970）	2008	纵向通风
9	解放碑环隧	重庆	主（1095）+支（1795）	2015	横向通风
10	包家山隧道	陕西	12100	2009	纵向+竖井
11	野三隧道	湖北	8150	2005	纵向+竖井
12	钱江隧道	浙江	3250	2014	纵向+竖井
13	金寨山隧道	重庆	8100	2005	纵向+竖井
14	秦岭终南山隧道	陕西	36040	2002	纵向+竖井
15	天井关隧道	山西	1100	2005	纵向
16	雪山	台湾	12900	2006	纵向+竖井
17	云台山隧道	江苏	8145	1990	纵向

纵观国内外隧道通风研究现状，国内外隧道的主要通风方式是纵向通风或是纵向通风与竖井相结合的通风方式，与横向通风相比，能节约投资，成本比较低，后期维护比较方便，通风效果较好，但目前的研究主要集中在对于长直隧道的通风方式研究，而对环形隧道的研究较少，适合环形隧道最优的通风方式还有待验证。

2 环形隧道的特点

2.1 环形隧道与长直隧道对比

2.1.1 结构不同

环形隧道整体结构呈现环状，结构较为复杂，主要是指由主通道、连接通道与隧道出入口组成的地下交通设施。主通道为连续环形道路[12]。主通道是指车辆在隧道中连续行驶的部分，主要设置在道路地面以下供机动车行驶，连接通道主要是联系地面交通与地下停车设施。而长直隧道的结构较为简单，大都为直筒形，只有一个隧道出、入口，无连接通道；环形隧道相对于长直隧道来讲最大的特点就是隧道中有很多的弧形隧道，正是由于二者结构的差异，当事故发生时，环形隧道内事故的危险性及救援难度远远大于长直隧道。环形隧道弯曲程度由曲率来衡量，曲率的计算公式如下：

$$\lim_{m\to m0}\frac{\omega}{\sigma}=\lim_{\sigma\to 0}\frac{\omega}{\sigma}=K \qquad (1)$$

式中：σ为弧长，ω为 m 与 m_0 切线的夹角，k 为曲率。

2.1.2 污染物分布规律不同

直型隧道由于其结构较为简单，污染物在隧道内不易聚积，有利于污染物的扩散与迁移，若隧道长度较短，自然通风就可以使污染物很好的排出，但污染物容易堆积在隧道洞口；而环形隧道结构较为复杂，污染物的扩散和迁移比较困难，不利于污染物的排出和消散，污染物容易在隧道内的弧形隧道的拐点处堆积，通风方式相对来说比较复杂，不能用单一的通风方式，应当注重加强隧道内局部通风，促使污染物更快的移动，提高通风效果与效率。

2.1.3 功能不同

城市环形隧道不仅为交通提供了便利，提升利用地下的交通空间、提高隧道区域附近的环境空气品质，还承担着一个重要的功能-地下停车库的连接，由于其有多个支道，可以连接隧道不同出口的地下车库，汇集不同方向的将其引入到达停车库，实现资源的高效合理利用，使车辆快捷的到达目的地，很大程度上减轻了交通的拥堵问题。

2.2 环形隧道的交通组织形式

交通组织形式对隧道的安全性也起着很大的作用，隧道的交通组织形式一般有单向交通、双向交通以及组合式交通形式。单向交通形式是指隧道内所有车辆的行驶方向相同；双向交通是指隧道内有来自两个方向行驶的车辆；组合式交通形式是指在主隧道内根据路段的不同，双向行驶和单向行驶同时存在的方式。对于环形隧道来讲，单向交通形式相对来说较为安全，车辆在行驶过程中不容易产生交叉。城市环形隧道的主要功能不仅较大的开发利用了地下空间，便于区域交通发展的同时，补充了道路交通资源并提高了交通环境品质[13]。

随着环形隧道应用的越来越广，在其建设中出现了以下几个问题：（1）由于其相比于长直隧道，结构较为复杂，所以车辆在隧道内行驶时间长，污染物容易聚积，不易排出，因此隧道内的通风标准要求较高[14]。（2）由于隧道内空间狭长，污染物的排放会影响到隧道内的照明效果，隧道内能见度比较低，发生事故且危险性高，且一旦发生事故，救援难度大。（3）环形隧道内污染物分布的规律比较复杂，不像长直隧道主要集中在洞口敏感区域，污染物的分布与隧道的形状有着密切联系，治理起来难度较大，不容易治理。（4）通风控制系统会随着隧道的形状、长度而发生变化。（5）隧道通风的能耗会变得更大，研究表明，通风的费用和隧道的长度是密切相关的。（6）由于环形隧道包含很多弧形隧道，弯曲处的污染物容易聚集，难以净化排出，这些问题都有待去解决。

3 一种太阳能隧道通风系统

隧道通风系统由区间隧道通风系统和车站隧道通风系统构成，影响隧道通风系统能耗的主要因素有室外温度、节能密度、最为关键的是隧道风机的运行模式[15]。现在隧道通风方式大多采用的是机械通风，一般都是在隧道顶壁上等距设置大功率的射流风机来实现对隧道通风，但一直开启射流风机，耗电量大且浪费能源，而且无法做到对入口灰尘的清洁且环形隧道弯曲处的污染物难以处理。现在提出一种太阳能隧道通风系统，将太阳能技术与

隧道通风技术相结合，能在一定程度上节约能源，便于处理隧道洞口及环形隧道弯曲处堆积的污染物，为以后隧道通风系统发展提供一个参考，具体如图 1 所示。

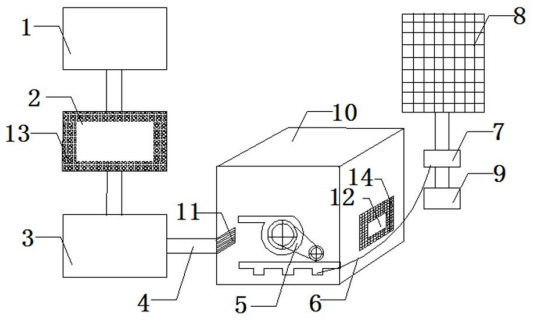

图 1　一种太阳能隧道通风系统设计图

Fig.1　A solar tunnel ventilation system design

1—收集箱；2—过滤器；3—集气箱；4—管道；5—风机；6—导线；7—控制器；8—太阳能光伏板；9—蓄电池；10—外壳；11—进风口；12—排风口；13—多孔陶瓷；14—滤网

其工作原理如下：将收集箱 1、过滤器 2、集气箱 3 和风机 5 这部分装置安装在隧道内部，控制器 7 与太阳能光伏板 8、蓄电池 9 这部分安装在隧道外部，当有机动车通过时，会产生大量粉尘及颗粒物，这时固定在隧道内的收集箱 1 收集隧道内的颗粒、粉尘及烟雾，然后经过高效过滤器 2，过滤收集箱 1 中的杂质以及颗粒物，高效过滤器 2 外的多孔陶瓷 13 可直接吸附空气中的悬浮物及胶体以及未被过滤干净的气体中的颗粒物。经过过滤后的气体进入到集气箱 3 中。与此同时，太阳能光伏板 8 受到太阳照射，将太阳能转化为电能，电能经过控制器 7 线路将其储存于蓄电池 9 内部，而风机 5 又与控制器 7 相连，因此蓄电池 9 可以为风机提供动力来源，到达供电目的，且电池的存在可以起到稳压作用，保证风机 5 间歇运转，保证系统的正常运行。此时，在集气箱 3 中的气体经过管道 4 通过风机壳体 10 上的进风口 11 进入到风机 5 中，然后经过滤网 14 后再次过滤，经由排风口 12 排出外面，以下对其进行节能性分析。

一种太阳能隧道通风系统的节能性分析：

（1）该系统可以合理的利用丰富的太阳能资源，我国陆地面积接收的太阳辐射总量在 3.3×10^{3}kJ/(m^2·年)～8.4×10kJ/(m^2·年)之间，相当于 2.4×10 亿 t 标准煤，属太阳能资源丰富的国家之一，利用前景十分广阔。且其安全可靠，无噪声，无污染排放外，绝对干净（无公害）；不受资源分布地域的限制，将太阳能转化为电能供给系统使用。（2）太阳能光伏板产电能有富裕量，将其储存于铅蓄电池内，系统在阴雨天或夜间也能维持正常运行；

（3）蓄电池采用免维护铅酸蓄电池，和铅酸蓄电池比它的电解液的消耗量非常小，在使用寿命内基本不需要补充蒸馏水。它还具有耐震、耐高温、体积小、自放电小的特点；

（4）风机采用无动力风机，可大大的节约能耗。风机能耗是影响通风系统能耗的重要因素，下面进行理论分析：

风机所需功率W（kW）计算公式为：

$$W = Q \times P / (3600 \times 1000 \times \eta_0 \times \eta_1) \quad (2)$$

故风机效率：

$$\eta = Q \times P / (3600 \times 1000) / W \quad (3)$$

单位风量耗功率计算公式为：

$$W_s = P / (3600 \times \eta t) \quad (4)$$

所以单位风量耗功率可以按照下式计算：

$$W_s = 1000W / Q \quad (5)$$

式中，Q为风量，m^3/h；W为功率，KW；P为风机的全风压，Pa；η_0 为风机的内效率，一般取 0.75～0.85，小风机取低值、大风机取高值；η_1 为机械效率，风机与电机直联取 1，联轴器联接取 0.95～0.98，用三角皮带联接取 0.9～0.95，用平皮带传动取 0.85。

由上式可知，若通风系统中风机采用无动力风机，可大大节约风机能耗，利用自然界的自然风速推动风机的涡轮旋转，及利用室内外空气对流的原理，将任何平行方向的空气流动，加速并转变为由下而上垂直的空气流动，能大大的节约能耗。

从以上四点来看，该系统能够充分利用现有富裕的太阳能资源，在一定范围内缓解用电的情况，解决了现有的现有隧道通风一般都是在隧道顶壁上等距设置大功率射流风机来实现对隧道通风，不耗电量大，浪费能源的问题。节约了能耗，提高了空气净化效果，提高了能源利用率，能够给隧道带来良好的通风效果。

4　隧道节能措施

节能是我国的基本国策，调查显示，城市轨道

交通系统用电量较大，其中通风空调系统占系统耗电的 50%以上，隧道通风系统又是影响通风空调系统耗电的重要因素之一。为了相应节能减排这一基本国策，需要不断的去探索采取隧道节能减排的措施，故提出以下几点予以参考：

（1）热能的利用。隧道内的热能一般来源于车辆尾气、照明等。用于动力输出的车辆尾气只占 20%～30%，大部分的热量都以热能的形式遗失，而照明灯具的大部分热量也会转化为热能，且公路隧道由于其埋深大，导致隧道内地热能比较丰富，这些热能都是提高隧道内热位差的途径，通过提高热位差来来提高自然风的利用，节约能耗[16]；

（2）隧道内壁材料。隧道内照明环境是非常重要的，由于隧道中污染物的排放，隧道内会形成一定量的烟雾，会降低隧道内的能见度，驾驶人员的安全无法保证，所以将反光蓄光材料应用到隧道上。不仅可以改善照明环境，更可以进行辅助照明，起到节能降耗的作用，隧道灯具的安装间距也是节能的重要因素[17]。

（3）一种隧道除尘车。应用静电除尘的原理，能够更好的处理隧道内部的汽车尾气，当污染物中的粒子直径较大时，静电除尘系统依然能够保证汽车尾气的排放质量[18]。且隧道除尘车为可移动式，不占用空间，除尘效率高，不仅提高隧道内空气质量和空气净化效果，也为隧道的良好通风效果提供了保障。

（4）通风方式的选择。通风方式的选择对隧道通风来讲至关重要，由于自然通风最节能，应大大提倡选用自然通风的方式，在此基础上，应当采取自然通风与机械通风相结合的方式来提高隧道内空气质量。其次，在机械通风方式中应采取中竖井与射流风机组合方案。研究表明，这种方式能最大程度的节约能耗，经济效益最为优良[19]。

（5）通风系统控制的合理选择。隧道通风方式的选择影响着工程造价及营运费用。为了让隧道通风系统更好的满足不同的需求，将污染物控制在合理范围内，提高控制效果，节约能源，隧道通风方式的选择是十分有必要的，目前常用的通风系统控制方法有模糊控制方法、反馈式控制方法、前馈式模糊方法、程序控制方法以及神经网络控制方法。研究表明，前馈式模糊方法能最大的节省电力消耗，并延长风机的寿命[20]。

5 结束语

太阳能隧道通风系统是一项值得研究和推广的新型通风方式，将太阳能技术与通风技术相结合，不仅有好的通风效果，在公路隧道通风系统耗能大的情况下，更能大大节约能源，也可以很好的解决弧形隧道污染物处理难度大的问题，同时也为隧道通风提供了新的发展思路。在日后隧道通风的应用方面的研究需要更多的专家学者对来环形隧道的节能通风方式进行研究，对于减少营运费用，加快设计速度，形成规范化的设计体系具有重要意义，进一步在工程中实现通风节能的效果，为国家节能减排政策献力，环形隧道作为地下交通隧道的一种方式，随着城市建设的不断发展，会发挥越来越重要的作用。

参考文献：

[1] 周艳召.城市地下环路隧道排烟试验研究[D].天津:天津商业大学,2018.

[2] 张浩.城市地下道路污染物排放与扩散特性反问题研究[D].北京:北方工业大学,2015.

[3] Chan-Hoon Yoon, Min-Suk Kim, Jin Kim. The evaluation of natural ventilation pressure in Korean long road tunnels with vertical shafts[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006,(21):472.

[4] Jaroslav Katolicky′, Miroslav J ′cha. Eulerian–Lagrangian model for traffic dynamics and its impact on operational ventilation of road tunnels[J]. Journal of Wind Engineering and IndustrialAerody- namics, 2005,(93):61-77.

[5] 陈建涛,李运华,刘东晓.纵向通风公路隧道空气污染浓度短时预报算法[J].北京航空航天大学学报,2011,1(37):114-118.

[6] 陈外才,陈林翼.基于热力学的单向单竖井公路隧道冬季通风模式分析[J].工程技术,2018(33):114.

[7] 朱德康.基丁.智能控制的隧道通风节能系统的研究[D].长沙:湖南大学,2007.

[8] 王丽.长大隧道的智能通风节能技术研究[D].昆明:昆明理工大学,2013.

[9] 刘克.城市地下交通联系隧道烟气控制研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2015.

[10] 刘明.长大公路隧道火灾集中通风排烟方式系统研究[D].长沙:中南大学,2009.

（下转第 690 页）