

# 高寒高海拔隧道通风流场分布规律综述

常永在, 刘亚东, 罗皓然, 郑天宝

重庆科技学院建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年3月25日; 录用日期: 2023年4月21日; 发布日期: 2023年4月28日

## 摘要

高寒高海拔地区隧道通风流场分布规律对于隧道安全运营和环境保护具有重要意义。本综述论文旨在全面分析和总结高寒高海拔隧道通风流场分布规律的研究进展。首先, 本文介绍了高寒高海拔隧道的特点, 如气候条件、地形和地质条件等。其次, 分析了影响通风流场分布的主要因素, 包括隧道结构、气候条件和车辆运行等。然后, 讨论了研究通风流场分布规律的主要方法, 包括实验方法、数值模拟方法和理论分析方法。此外, 总结了高寒高海拔隧道通风流场分布规律研究的最新进展和面临的挑战。本文通过系统地梳理现有研究成果, 为后续研究和实际工程应用提供有益的参考。

## 关键词

高寒高海拔隧道, 通风流场分布, 影响因素, 研究方法, 挑战与进展

# A Review of the Distribution Law of Ventilation Flow Field in Alpine High Altitude Tunnels

Yongzai Chang, Yadong Liu, Haoran Luo, Tianbao Zheng

School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 25<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The distribution law of ventilation flow field in high cold and high altitude tunnels is of great significance for safe tunnel operation and environmental protection. The purpose of this review paper is to comprehensively analyze and summarize the research progress on the distribution law of ventilation flow field in alpine high altitude tunnels. Firstly, this paper introduces the characteristics of alpine high altitude tunnels, such as climatic conditions, topography and geological condi-

tions. Secondly, the main factors affecting the distribution of ventilation flow field are analyzed, including tunnel structure, climatic conditions and vehicle operation. Then, the main methods to study the distribution law of ventilation flow field are discussed, including experimental methods, numerical simulation methods and theoretical analysis methods. In addition, the latest progress and challenges in the study of ventilation flow field distribution laws in high cold and high-altitude tunnels are summarized. By systematically sorting out the existing research results, this paper provides useful references for subsequent research and practical engineering applications.

## Keywords

High Cold and High Altitude Tunnels, Ventilation Flow Field Distribution, Influencing Factors, Research Methods, Challenges and Progress

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 国内外研究现状

由于西部大部分地区海拔较高同时山区较多,修建铁路及公路时不可避免地需要修建隧道,即使在平原地区修建隧道也是一件工作量和难度非常大的工程,在高寒高海拔地区修建隧道更是一件难度更大的工程,在该地区修建隧道面临着“高寒、高海拔、低气压”的特殊条件,这些条件使得隧道通风方案不能像在平原地区修建隧道那样使用常规的经验。

由此可见,为了西部大开发战略的顺利完成,隧道设施的建设我们是必须要面对的,为了更好更快地修建隧道,更快地完成基础设施的建设,隧道通风是我们在修建隧道时所必须考虑的关键内容之一。而目前国内外关于高寒高海拔隧道通风于不够深入的阶段,针对高寒高海拔隧道的通风分析研究较少。

早期国外铁路隧道通风研究考虑依赖自然风,而非机械设备。后来,学者们提议使用施工剩余的辅助坑道(如竖井和斜井)实现自然通风。例如,20世纪40年代英国的Kiesby隧道(2218米)使用两个18米直径的竖井实现自然通风;利物浦隧道(1852米)通过在竖井底部烧火加热以促进空气流动;Morley隧道(2216米)则设有四个竖井进行自然通风[1]。竖井自然通风会影响隧道内的气流和竖井口位置,因此研究它们之间的关系很重要。在20世纪40~50年代,随着内燃机列车的出现,研究重点转向了分析列车排放的有害成分,研究烟气在隧道内的流动规律,以及隧道通风排污问题[2]。例如,美国胡萨克隧道(7645米)在1946年采用竖井内装置轴流风机实现机械通风。20世纪60年代以后,随着高速铁路和电气化铁路的发展,隧道通风研究的焦点转向了压力波和隧道内热湿环境等方面[3][4]。2000年底,挪威西部的洛达尔隧道(24.5公里)建成通车,成为全球最长公路隧道[5][6],洛达尔隧道通风系统采用遗留通风斜井和射流风机组成纵向通风,并加设烟尘净化器,充分利用辅助坑道实现成功的机械通风[7]。

信息技术发展推动研究人员将隧道通风研究模块化并用编程处理,实现设计自动化。其中,A. G. Bendelius [8]等人在IDA环境下开发了MTFVTP程序,可以模拟隧道内流场特性;苏格兰的DAI [9]等研究员用编程软件,研究地铁内热环境的长短期变化规律。加州大学的Mepherson [10]使用CLIMSIM模拟了隧道中岩土层的温度变化。韩国的Chan-Hoon Yoon [11]和他的团队使用编程方法研究了带竖井的公路隧道的自然风压。Cooper P.和Linden P. F. [12]等人用编程软件研究了隧道内自然风压的成因和主要影响因素。在数值模拟方面,L. Gidhagen [13]等人建立了一个三维隧道通风模型,研究了运行期间隧道内风流场的分布。在2003年,Katolicky和Jicha [14]使用Eulerian-Lagrangian模型研究,发现交通流量、车速

和隧道长度会影响隧道内的风速,随着交通密度增加,风速相对稳定;但车速增加则导致风速显著增加。

在五十年代末,中国主要关注内燃机车隧道通风,并对铁路隧道烟气和卫生标准进行了众多研究[15]。在二十世纪末,中国电气化铁路建设推动了隧道通风技术的快速发展。铁路专业设计院等单位[2]在丰沙线7座隧道的通风试验后提出了建议:1) 1.5公里以下的隧道不需要机械通风;2) 通风量应按“挤压理论”计算,同时考虑利用列车活塞风;3) 通风速度不应低于3 m/s。这些建议也适用于高海拔地区的铁路隧道通风技术。晃庚奇[16]研究了大通山铁路隧道的施工通风设计标准、风量风压计算和设计原则等方面。王峰等人[17]研究了地铁内通风竖井对热湿环境和压力的影响,并得出了设置通风竖井的设计原则,他们认为,竖井应考虑列车运行模式,设置在列车匀速行驶的区间段内且靠近车站出站端。高寒高海拔隧道的运营通风在节省通风费用和保障行车安全方面具有重要意义[18]。段宝文[19]研究了将隧道群折算为一条整体隧道的通风设计方法,指出该方法存在过度保护的问题,因为风机可能会被闲置,从而浪费资源。王永东[20]及其团队提出了一种新型的组合通风方式,适用于长隧道的通风设计,该方式包括确定风井位置、计算设计风量、确定横通道位置、计算换气比和校核污染物浓度的设计流程,他们还建议在长达7至10公里且单向纵坡陡峭的隧道中采用该通风方案。车轮飞[21]等人为解决跨海超长隧道无法建岛设通风井的问题,设计了一种新型的送排通风方式,即平导送风和顶部排烟道排风系统,这种方式在青岛第二海底隧道中成功应用,解决了海中送排分段通风的问题,为跨海隧道的超长纵向通风提供了新思路。王明年[22]等人进行了高寒高海拔地区公路隧道的现场测试,并确定了应用于隧道运营阶段的CO和烟尘海拔高度修正系数,他们还制定了适用于高海拔隧道低压、低氧和低温等特殊环境的通风控制标准。郭志杰[23]和他的团队使用类比法和车辆排放实验,研究了高海拔公路隧道通风设计方面的问题,他们提出了适用于高海拔隧道烟雾排放量年折减率的取值,并为高海拔隧道的通风设计提供了参考。陈超[24]及其团队通过现场测试研究了城市道路车辆的CO、NO<sub>x</sub>综合平均排放因子,这些研究结果为城市隧道的通风设计提供了依据,尤其是在城市隧道联接复杂、交通流量大、车速慢、污染物排放量较高等情况下。张奥宇[25]及其团队运用通风网络算法分析了城市地下互通匝道和主线的风量和污染物分布,他们还提出了风机房风机开启模式和射流风机配置的建议,为城市地下结构物的通风设计提供了依据。姜学鹏[26]及其团队对隧道自然通风进行了研究,重点研究了城市隧道的多匝道设置、通风孔的布置和数量对污染物排放效率的影响,他们提出了有关城市多匝道隧道通风设计的建议,以提高排污效率。曹正卯[27]等的现场试验验证了采用全射流纵向排烟是可行的,这种方式是公路隧道排烟通风方式中的一种,主要用于特长公路隧道,是一种重点排烟的方式。李杰[28]及其团队研究了公路隧道通风排烟问题,并提出了一种解决全射流纵向排烟问题的通风网络计算模型和解算方法,该方法可应用于公路隧道通风设计,为解决公路隧道通风问题提供了新思路。陈建忠[29]及其团队研究了大跨度公路隧道的侧向重点排烟,发现随着隧道宽度的增加,排烟效率会降低,该研究成果可为大跨度公路隧道的通风排烟设计提供指导。徐志胜[30]等人利用数值模拟研究了曲线隧道中风机布置对风速、压力分布及射流风机升压系数的影响,结果表明,在直线隧道中布置射流风机可提高升压效率,曲率半径越小,提升效果越显著,升压系数的提升范围为8.5%~27%。周飞龙[31]等对云南某高落差螺旋隧道进行了数值模拟分析,发现隧道螺旋结构对通风气流分布影响不大,但在每台射流风机作用区域内,风速在隧道内外侧的纵向衰减特征不同,还存在部分气流回流的情况。曲线线型对公路隧道运营通风有着一定影响,白贇[32]等人采用FLUENT软件对曲线线型公路隧道通风进行了三维数值模拟。

隧道通风是铁路和公路隧道安全和环境保护的重要方面,而信息技术的发展推动了隧道通风研究的自动化和模块化。随着内燃机列车的出现和高速铁路、电气化铁路的发展,隧道通风研究的焦点逐渐转向了压力波和隧道内热湿环境等方面。在设计隧道通风系统时,需要考虑诸如通风量、通风速度、通风

方式、通风设备等多个方面因素，以保证通风效果和安全性。另外，隧道通风研究中也需要考虑自然通风和机械通风的优缺点。自然通风可通过辅助坑道实现，具有设备投资少、维护成本低等优点，但其受外界气象条件的影响较大。机械通风可保证通风效果，但设备投资和维护成本较高。因此，综合考虑经济性和实际效果，需要在设计隧道通风系统时权衡利弊，选择适当的通风方式和设备。

## 2. 高寒高海拔隧道的特点

在本节中，我们将重点讨论高寒高海拔隧道的特点，包括低气温、高海拔对隧道通风的影响，以及地质和地形条件。这些因素对隧道通风流场分布产生了显著影响，需要在隧道设计和运营中予以充分考虑。

### 2.1. 低气温、高海拔对隧道通风的影响

高寒高海拔地区通常具有较低的气温、较大的气压差和较复杂的气候条件。低气温可能导致隧道内部结冰、凝结等现象，影响通风设备的正常运行和维护。同时，高海拔地区空气稀薄，氧气含量较低，人体对缺氧的耐受能力有限。在这种环境下，隧道通风系统需要提供足够的新鲜空气以维持人员和设备的正常运行。

### 2.2. 地质和地形条件

高寒高海拔地区的地质和地形条件通常较为复杂，地震、滑坡、泥石流等自然灾害的风险较高。这些因素可能对隧道结构的稳定性和通风系统的安全性产生影响。在隧道设计和建设过程中，应充分考虑这些地质和地形条件，以确保隧道的安全和可靠性。

### 2.3. 隧道内环境参数

高寒高海拔隧道内的环境参数，如温度、湿度、气压等，与低海拔地区存在显著差异。这些参数直接影响通风流场的分布和热力学特性。例如，高海拔地区的气压较低，可能导致空气流动阻力的增大，从而影响通风效果。此外，低温环境下的水汽凝结可能导致隧道内湿度的增加，进一步影响通风性能。

综上所述，高寒高海拔隧道的特点对通风流场分布产生了重要影响。在隧道设计和运营过程中，应充分考虑这些因素，以确保隧道通风系统的有效性和安全性。

## 3. 影响高寒高海拔隧道通风流场分布的主要因素

在本节中，我们将探讨影响高寒高海拔隧道通风流场分布的主要因素。这些因素包括隧道的几何特性、通风方式、外部气象条件和隧道内部热源等。充分了解这些因素对通风流场的影响，有助于提高隧道通风系统的设计和运营效果。

### 3.1. 隧道几何特性

隧道的几何特性，如长度、断面形状和坡度，对通风流场分布具有显著影响。一般来说，隧道长度越长，通风阻力越大，通风效果越差。隧道断面形状也会影响空气流动的阻力和通风效果。此外，隧道的坡度会引起空气流动的压力差，从而影响通风流场的分布。

### 3.2. 通风方式

隧道通风方式主要包括自然通风、机械通风和混合通风。自然通风主要依赖于气压差和温差引起的空气流动，通常适用于较短或较低通行密度的隧道。机械通风通过风机等设备强制排放或引入空气，适

用于较长或通行密度较高的隧道。混合通风则结合了自然通风和机械通风的优点。不同的通风方式对通风流场分布具有不同的影响。

### 3.3. 外部气象条件

外部气象条件，如风速、风向、温度和湿度等，对高寒高海拔隧道通风流场分布具有重要影响。风速和风向会改变隧道两端的气压差，从而影响通风效果。温度和湿度的变化可能导致隧道内部结冰、凝结等现象，进一步影响通风流场的分布。

通过深入分析这些影响因素，有助于更好地理解高寒高海拔隧道通风流场分布规律，为隧道通风系统的设计和优化提供依据。

## 4. 高寒高海拔隧道通风流场分布规律的研究方法

本节将介绍用于研究高寒高海拔隧道通风流场分布规律的主要方法，包括实验方法、数值模拟方法和理论分析方法。通过运用这些方法，可以更好地理解通风流场的特性，为隧道通风系统的设计和运营提供依据。

### 4.1. 实验方法

实验方法是研究隧道通风流场分布的一种直接方法。这些方法包括风洞试验和现场实测。

#### 4.1.1. 风洞试验

风洞试验是一种模拟隧道通风流场的实验方法，通过在风洞中设置模型隧道，可以在受控条件下研究不同参数对通风流场分布的影响。风洞试验的优点是在较短时间内获得大量数据，有助于深入理解通风流场的基本规律。然而，风洞试验的局限性在于难以完全模拟现实中的高寒高海拔环境和复杂地形条件。

#### 4.1.2. 现场实测

现场实测是另一种直接测量隧道通风流场的方法。通过在隧道内部安装测量设备，如风速计、温湿度计等，可以实时监测隧道通风流场的变化。现场实测的优点是能够获得实际运行环境下的数据，具有较高的可靠性。然而，现场实测的局限性在于数据收集过程较为耗时，且可能受到外部因素的干扰。

### 4.2. 数值模拟方法

数值模拟方法是一种基于计算机技术的研究方法，通过建立数学模型来模拟隧道通风流场。这些方法主要包括计算流体动力学(CFD)和有限元分析(FEA)。

#### 4.2.1. 计算流体动力学(CFD)

计算流体动力学是一种基于流体力学原理的数值模拟方法。通过对流体控制方程进行离散和求解，可以预测通风流场的分布和性能。CFD 具有较高的灵活性和精度，适用于研究各种通风条件和隧道结构。然而，CFD 模拟需要较强的计算能力，且模型的准确性受到初始条件和边界条件的影响。

#### 4.2.2. 有限元分析(FEA)

有限元分析是一种基于数值方法的工程计算方法，通过将连续的问题离散成有限个元素，求解各元素的局部解，最终获得整体解。FEA 可以用于研究隧道通风流场分布的稳定性和结构响应。然而，FEA 方法较为耗时，且在模拟复杂流场时可能受到计算资源和模型精度的限制。

### 4.3. 理论分析方法

理论分析方法主要基于流体力学、热力学等基本理论，通过分析各种因素对通风流场的影响，总结出通风流场分布的规律。理论分析方法的优点在于可以提供对现象的深入理解，有助于指导实际工程应用。然而，理论分析方法的局限性在于可能无法准确描述现实中的复杂情况，需要结合实验和数值模拟方法进行验证和修正。

综上所述，实验方法、数值模拟方法和理论分析方法都在高寒高海拔隧道通风流场分布规律的研究中发挥着重要作用。通过综合运用这些方法，可以更好地探索和解决隧道通风过程中的问题，为隧道通风系统的设计和运营提供有益的参考。

## 5. 高寒高海拔隧道通风流场分布规律的研究进展与挑战

本节将讨论高寒高海拔隧道通风流场分布规律研究的最新进展，以及在设计和运营过程中面临的挑战。通过总结现有研究成果，可以为后续研究提供参考和启示。

### 5.1. 研究进展

近年来，随着高寒高海拔地区基础设施建设的不断推进，隧道通风流场分布规律研究取得了显著进展。这些进展包括：

1) 通风流场模拟技术的发展：随着计算机技术和数值模拟方法的不断发展，研究者已能够更加准确地模拟高寒高海拔隧道通风流场的分布规律。例如，计算流体动力学(CFD)方法已成功应用于多个隧道通风工程案例。

2) 新型通风方案的提出与实践：针对高寒高海拔隧道的特殊环境条件，研究者提出了一系列创新的通风方案。这些方案包括绿色能源驱动的通风系统、智能通风控制技术等，有效提高了隧道通风的效率和可靠性。

3) 实验方法的改进：为了更好地研究高寒高海拔隧道通风流场分布规律，研究者在实验方法上进行了改进和创新。例如，通过改进风洞试验和现场实测技术，使得实验数据更加精确和可靠。实验方法是研究隧道通风流场分布的一种直接方法。这些方法包括风洞试验和现场实测。

### 5.2. 面临的挑战

尽管取得了显著进展，高寒高海拔隧道通风流场分布规律研究仍面临一些挑战，主要包括：

1) 高寒高海拔环境模拟的复杂性：由于高寒高海拔地区气象条件复杂且易变，现有的模拟方法往往难以准确反映实际情况。因此，如何更好地模拟这些环境条件仍是一个重要挑战。

2) 数据获取的困难：由于高寒高海拔地区的恶劣环境，现场实测数据的获取往往受到诸多限制。如何在这种环境下获得高质量的实测数据仍是一个待解决的问题。

3) 通风系统的能源消耗和环境影响：隧道通风系统需要消耗大量能源，同时可能对周围环境产生影响。如何降低能源消耗、减少环境影响，同时确保通风效果仍是一个亟待研究的挑战。

4) 实时监测与智能控制技术的发展：随着物联网和大数据技术的迅速发展，实时监测和智能控制技术在隧道通风领域具有巨大潜力。如何将这些技术应用于高寒高海拔隧道通风流场分布规律研究，以提高通风系统的自适应能力和效率，是一个重要的研究方向。

5) 综合多种研究方法：理论分析、实验方法和数值模拟方法各自具有优势和局限性。如何有效地综合运用这些方法，以提高研究的准确性和实用性，是高寒高海拔隧道通风流场分布规律研究的一个关键挑战。

总之，高寒高海拔隧道通风流场分布规律研究已取得了一定的进展，但仍面临诸多挑战。未来研究应继续关注这些挑战，努力提高隧道通风系统的设计和运营效果，为高寒高海拔地区的基础设施建设和可持续发展贡献力量。

## 6. 结论

本综述对高寒高海拔隧道通风流场分布规律进行了全面的分析和总结。通过阐述高寒高海拔隧道的特点、通风流场的主要影响因素、研究方法、研究进展与挑战，为后续研究和实际工程应用提供了有益的参考。

首先，本文介绍了高寒高海拔隧道的特点，如气候条件、地形和地质条件等。这些特点决定了高寒高海拔隧道通风流场的复杂性，对通风系统的设计和运营提出了较高的要求。

其次，本文分析了影响高寒高海拔隧道通风流场分布的主要因素，包括隧道结构、气候条件、车辆运行等。了解这些因素对通风流场分布的影响，有助于更好地设计和优化隧道通风系统。

接着，本文介绍了研究高寒高海拔隧道通风流场分布规律的主要方法，包括实验方法、数值模拟方法和理论分析方法。通过综合运用这些方法，可以更准确地揭示通风流场的特性和规律，为实际工程提供科学依据。

此外，本文总结了高寒高海拔隧道通风流场分布规律研究的最新进展和面临的挑战。虽然已取得一定成果，但仍需继续关注并解决诸多挑战，以提高隧道通风系统的性能和可靠性。

综上所述，高寒高海拔隧道通风流场分布规律研究具有重要的理论意义和实践价值。本文通过系统地总结现有研究成果，为高寒高海拔隧道通风流场分布规律的后续研究和工程实践提供了有益的参考。希望未来研究能够进一步发现新的规律和方法，以促进高寒高海拔地区基础设施建设的可持续发展。

## 基金项目

重庆科技学院 2022 年度大学生科技创新训练计划项目，项目编号：2022136。

## 参考文献

- [1] 金学易, 陈文英. 隧道通风及隧道空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [2] 铁道部第二勘测设计院. 铁路隧道运营通风[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [3] Barrow, H. and Pope, C.W. (1994) Theoretical Global Energy Analysis for a Railway Tunnel and Its Environment, with Special Reference to Periodic Temperature Change. *Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Liverpool, July 1994, 267-280.
- [4] Danko, G. and Mousset-Jones, P. (1994) Simulation of Temperature and Humidity Variation in Subsurface Tunnels with Moving Heat Sources. *Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Liverpool, July 1994, 267-280.
- [5] Lacroix, D. (1999) Fire in the Mont Blanc Tunnel: Facts & Lesson. Centre d'Etudes des Tunnels, Member French Task Force.
- [6] Bettis, R. (1995) Controlling Smoke in Tunnel Fires, Fire Prevention, June.
- [7] Martegani, A.D. and Pavesi, G. (1993) An Experimental Study on Longitudinal Ventilation System. CICC.
- [8] Bendelius, A.G. (1997) The Memorial Tunnel Fire Tunnel Ventilation Test Program—Past, Present and Future. Japan 9th AVVT.
- [9] Dai, G. and Vardy, A. (1994) Tunnel Temperature Control by Ventilation. *8th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicles*, Liverpool, July 1994, 175-197.
- [10] McPherson, M.J. (1986) The Analysis and Simulation of Heat Flow into Underground Airways. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, **4**, 165-195. <https://doi.org/10.1007/BF01560715>
- [11] Yoon, C.-H., Kim, M.-S. and Kim, J. (2006) The Evaluation of Natural Ventilation Pressure in Korean Long Road Tunnels with Vertical Shafts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **21**, 472. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.108>

- [12] Cooper, P. and Linden, P.F. (1996) Natural Ventilation of an Enclosure Containing Two Buoyancy Sources. *Journal of Fluid Mechanics*, **311**, 153-176. <https://doi.org/10.1017/S0022112096002546>
- [13] Gidhagen, L., Johansson, C., Strom, J., et al. (2003) Model Simulation of Ultrafine Particles inside a Road Tunnel. *Atmospheric Environment*, **37**, 2023-2036. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00124-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00124-9)
- [14] Katolicky, J. and Jicha, M. (2005) Eulerian-Lagrangian Model for Traffic Dynamics and Its Impact on Operational Ventilation of Road Tunnels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics: The Journal of the International Association for Wind Engineering*, **93**, 61-77. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.09.002>
- [15] 金学易. 隧道通风及隧道空气动力学[M]. 南昌: 华东交通出版社, 1983.
- [16] 晁庚奇. 青藏高原高寒地区长大隧道通风技术[J]. 铁道标准设计, 2007(1): 74-76.
- [17] 王峰, 邓园也, 王明年. 地铁隧道竖井位置优化数值模拟研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(3): 569-573.
- [18] 严涛, 李坤杰, 秦鹏程, 包逸帆, 王明年, 颜冠峰. 高海拔公路隧道运营通风关键技术研究综述[J]. 现代隧道技术, 2019(S2): 88-95.
- [19] 段宝文, 田红旗, 刘金兴, 吴成朋. 山区高速公路隧道群运营通风设计优化研究[J]. 科技与创新, 2020(9): 9-12.
- [20] 王永东, 化思豪, 何志伟, 等. 特长公路隧道横通道结合单风井混合式通风设计体系[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 161-170.
- [21] 车轮飞, 肖明清, 曾艳华, 等. 青岛第二海底隧道新型海中送排通风方案探析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 300-310.
- [22] 王明年, 李琦, 于丽, 等. 高海拔隧道通风, 供氧, 防灾与节能技术的发展[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(10): 1209-1216.
- [23] 郭志杰, 孙涛, 张灿程, 等. 高海拔超长隧道通风烟雾, CO 基准排放量折减率取值建议[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增 1): 341-345.
- [24] 陈超, 胡秦疆, 邓奕雯, 等. 基于实测法的下凹式城市地下道路 CO, NO<sub>x</sub> 排放因子研究[J]. 中国路学报, 2017, 30(9): 116-124.
- [25] 张奥宇, 邓敏. 建宁西路地下互通通风系统运营优化研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增 2): 462-468.
- [26] 姜学鹏, 余璨, 毛杨, 等. 多匝道城市公路隧道通风孔布置研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(5): 560-564.
- [27] 曹正卯, 张琦, 陈建忠. 6 km 长公路隧道全射流纵向排烟现场实体火灾试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增 1): 94-100.
- [28] 李杰, 严晓楠, 叶绪谦, 等. 特长公路隧道全射流火灾通风网络解算研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(2): 20-26.
- [29] 陈建忠, 曹正卯, 张琦. 侧壁排烟模式下超宽断面沉管隧道火灾排烟效率研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增 1): 393-399.
- [30] 徐志胜, 陶浩文, 王天雄, 等. 隧道曲率半径对空气射流流场特性及升压效率的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(2): 415-423. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0935>
- [31] 周飞龙, 陈全胜, 贾帅动, 等. 高落差螺旋隧道运营期通风特性研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 150-156.
- [32] 白赟, 袁松. 曲线线型对公路隧道运营通风影响研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(13): 117-119.