

基于 Fluent 的地下工程通风数值模拟



裴桂红 刘建军 潘 洁 冷 静 著

Numerical Modeling

of Underground Engineering
Ventilation Based on Fluent Software

 科学出版社

基于 Fluent 的地下工程通风数值模拟

**Numerical Modeling of Underground Engineering
Ventilation Based on Fluent Software**

裴桂红 刘建军 潘 洁 冷 静 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是作者近年来在地下工程通风问题数值模拟分析方面进行理论研究和实际应用的成果总结。全书共分7章,第1章简要叙述数值模拟的发展及其研究现状,分析地下工程通风问题的特点及其数值模拟方法;第2章介绍Fluent软件的特点及应用领域、数值计算方法及地下工程通风问题的数值模拟步骤;第3章介绍隧道通风模型实验的相似理论及纵向通风实验结果;第4章介绍采用Fluent软件对4种不同的风机串联模式下的隧道内风速和压力分布情况的数值模拟成果;第5章给出在隧道洞口外静风和有风的情况下废气的扩散情况的数值模拟结果;第6章介绍煤矿采场有瓦斯涌出情况下的通风模拟理论和方法;第7章介绍采空区瓦斯运移规律数值模拟成果。

本书可供土木工程、矿业工程、水利水电工程、交通运输工程等地下工程专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于Fluent的地下工程通风数值模拟/裴桂红等著. —北京:科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-048498-7

I. ①基… II. ①裴… III. ①地下工程—通风—数值模拟 ②流体力学—工程力学—计算机仿真—应用软件 IV. ①TU96 ②TB126-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第123295号

责任编辑:张展罗莉/责任校对:邓利娜 刘莉莉

责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年8月第一次印刷 印张:8 1/2

字数:163 800

定价:69.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

19 世纪是桥的世纪, 20 世纪是高层建筑的世纪, 而 21 世纪是地下工程的世纪。特别是随着城市的快速发展, 资源的过度开发, 必然会带来环境污染、能源紧张、交通拥挤和水资源短缺等严重问题, 因此人们不得不向地下要生存空间, 以缓解土地资源紧张而带来的压力。地下工程在我国资源开发、城市建设、交通工程和可持续发展中将发挥不可替代的作用。

地下工程是指在岩体或土层中修建的通道和各种类型的地下建筑物, 包括交通运输方面的铁路、道路、运河隧道, 以及地下铁道和水底隧道等; 工业和民用方面的市政、防空、采矿、储存和生产等用途的地下工程等; 军用方面的各种国防坑道等; 水利发电工程方面的地下发电厂房以及其他各种水工隧洞等。

地下工程具有恒温、恒湿、隔热、遮光、气密、隐蔽、安全等诸多优点, 但同时也具有相对封闭, 与地表联系通道很少等特点。地下工程通风担负着向地下空间供给新鲜空气、排除有害气体以及粉尘和炮烟等有害物质, 为地下工程建造和运营提供所需的空气环境的重要作用。地下工程通风不仅是地下工程的重要组成部分, 而且也是必不可少的劳动保护措施, 又是改善地下环境的安全技术手段, 对保护建造期间作业人员以及运营期间的人员健康与安全和发展地下工程都有着重要的现实意义。

本书是作者近年来在地下工程通风问题数值模拟分析方面进行理论研究和实际应用的成果总结。主要是以煤矿采煤工作面通风和隧道运营通风为研究对象, 在国内外文献调研的基础上, 通过渗流力学、岩石力学、采矿工程等多学科交叉, 采用理论分析、模型试验和数值计算相结合的方法, 建立了地下工程通风的数学力学模型, 通过模型实验和数值模拟结合的方法, 揭示了地下工程通风的基本规律, 给出了通风优化设计的方法和结果。

全书共分 7 章, 第 1 章简要叙述数值模拟的发展及其研究现状, 分析地下工程通风问题的特点及其数值模拟方法; 第 2 章介绍 Fluent 软件的特点及应用领域、数值计算方法及地下工程通风问题的数值模拟步骤; 第 3 章介绍隧道通风模型实验的相似理论及纵向通风实验结果; 第 4 章介绍采用 Fluent 软件对 4 种不同的风机串联模式下隧道内风速和压力分布情况的数值模拟成果; 第 5 章给出隧道洞口外静风和和风的情况下废气的扩散情况的数值模拟结果; 第 6 章介绍煤矿采场有瓦斯涌出情况下的通风模拟理论和方法; 第 7 章介绍采空区瓦斯运移规律数值模拟成果。

感谢四川省煤炭产业集团有限责任公司武玉梁高工、中国煤炭科工集团有限公司雷云工程师在资料收集方面提供的帮助，同时感谢四川省安全生产科技计划项目的大力支持。

限于作者水平，书中难免有错误与不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 地下工程通风概述	1
1.2 公路隧道通风概述	2
1.3 煤矿地下采场通风概述	7
1.3.1 煤矿地下采场通风方式	8
1.3.2 煤矿采场通风的研究现状	13
第 2 章 Fluent 软件的特点及数值模拟方法	19
2.1 Fluent 软件概况	19
2.1.1 Fluent 软件的原理	20
2.1.2 Fluent 软件的基本构成	21
2.1.3 Fluent 软件的计算类型及应用领域	22
2.1.4 Fluent 多孔介质模型	22
2.1.5 Fluent 软件判断收敛的准则	23
2.1.6 求解分析过程	23
2.2 流体动力学控制方程	24
2.3 射流运动基本方程	26
2.4 多孔介质的内部损失	28
2.5 多孔介质中的湍流处理	28
第 3 章 隧道纵向通风模型实验	29
3.1 隧道内流体假设	29
3.2 相似原理	30
3.3 相似准则	31
3.4 模型率	33
3.5 隧道模型实验	34
3.5.1 实验材料与设备	34
3.5.2 摩阻系数的确定	36
3.5.3 实验结果	37
3.6 数值模拟与模型实验的对比分析	40

3.6.1 隧道内气体简化	40
3.6.2 计算模型	41
3.6.3 计算值与实验值进行对比	42
3.7 本章小结	44
第 4 章 纵向通风下不同风机组合方式的数值模拟	46
4.1 计算模型	46
4.2 单股射流和双股射流的对比	48
4.3 4 种不同工况的对比	55
4.4 本章小结	58
第 5 章 隧道洞口废气扩散数值模拟	59
5.1 隧道洞口污染气体的特性	59
5.2 隧道洞口污染气体扩散的基本理论	59
5.3 隧道洞口污染气体扩散的数值模拟	60
5.3.1 计算模型	61
5.3.2 数值模拟结果和分析	61
5.4 本章小结	68
第 6 章 采场瓦斯运移特征及数学表征	70
6.1 采空区瓦斯运移特征	71
6.1.1 采空区基本特征	71
6.1.2 采空区瓦斯涌出特征	74
6.1.3 采空区瓦斯运移特征	77
6.1.4 采空区漏风	79
6.1.5 采空区瓦斯治理技术	80
6.2 煤层瓦斯运移特征	83
6.2.1 煤储层的基本特征	84
6.2.2 煤层瓦斯渗流特征	85
6.3 采场气体流动的数学模型	90
6.4 本章小结	92
第 7 章 采空区瓦斯运移规律数值模拟	94
7.1 计算模型	94
7.1.1 物理模型	95
7.1.2 Gambit 建模与网格划分	96
7.1.3 边界条件	96

7.2 数值模拟	97
7.2.1 孔隙率均匀分布流场模拟	97
7.2.2 孔隙率非均匀分布流场模拟	104
7.3 本章小结	116
参考文献	117

Contents

1	Introduction	1
1.1	Overview of Underground Engineering Ventilation	1
1.2	Overview of Highway Tunnel Ventilation	2
1.3	Overview of Ventilation of Coal Mine Stope	7
1.3.1	Method of Ventilation of Coal Mine Stope	8
1.3.2	Research Status of Coal Mine Stope Ventilation	13
2	Features of Fluent Software and Numerical Modeling Method	19
2.1	General Introduction of Fluent	19
2.1.1	Principle of Fluent	20
2.1.2	Basic Constitution of Fluent	21
2.1.3	Calculation Type and Application Field of Fluent	22
2.1.4	Porous Media Model in Fluent	22
2.1.5	Convergence Criterion of Fluent	23
2.1.6	Solving Procedure	23
2.2	Governing Equations of Fluid Dynamics	24
2.3	Basic Equation of Jet Flow	26
2.4	Internal Loss in Porous Media	28
2.5	Turbulence in Porous Media	28
3	Tunnel Longitudinal Ventilation Model	29
3.1	Hypothesis of Fluid in Tunnel	29
3.2	Principle of Similitude	30
3.3	Criterion of Similitude	31
3.4	Model Scale	33
3.5	Experiment of Tunnel Model	34
3.5.1	Experimental Material and Equipment	34
3.5.2	Definition of Coefficient of Friction Resistance	36
3.5.3	Experiment Results	37
3.6	Comparative Analysis of Numerical Modeling and Experiments	40
3.6.1	Simplification of Gas in Tunnel	40

3.6.2	Calculation Model	41
3.6.3	Comparison of Calculation Values and Experiment Values	42
3.7	Chapter Summary	44
4	Numerical Modeling of Different Fans Combinations under the Longitudinal Ventilation	46
4.1	Calculation Model	46
4.2	Comparison of Singe Jet Flow and Double Jet Flow	48
4.3	Comparison of Four Different Conditions	55
4.4	Chapter Summary	58
5	Numerical Simulation of Exhaust Gas Diffusion at Tunnel Portal	59
5.1	Properties of Pollution Gas at Tunnel Portal	59
5.2	Basic Theory of Pollution Gas Diffusion	59
5.3	Numerical Simulation of Pollution Gas Diffusion	60
5.3.1	Calculation Model	61
5.3.2	Results and Analysis of Numerical Simulation	61
5.4	Chapter Summary	68
6	Characterization and Mathematics Representation of Gas Transfer in Stope	70
6.1	Characteristics of Gas Transfer in Stope	71
6.1.1	Basic Features of Mining Goaf	71
6.1.2	Gas Discharge Features at Goaf	74
6.1.3	Gas Tranfer Features at Goaf	77
6.1.4	Air Leakage at Goaf	79
6.1.5	Gas Treatment Technology at Goaf	80
6.2	Characteristics of Gas Transfer in Coal Seam	83
6.2.1	Basic Features of Coal Reservoir	84
6.2.2	Seepage Law of Coal Seam Gas	85
6.3	Mathematical Model of Gas Flow in Mining Stope	90
6.4	Chapter Summary	92
7	Numerical Simulation of Gas Transfer at Goaf	94
7.1	Calculation Model	94
7.1.1	Physical Model	95
7.1.2	Gambit Modeling and Gridding	96

7.1.3 Boundary Condition	96
7.2 Numerical Simulation	97
7.2.1 Flow Field Simulation of Uniform Porosity Model	97
7.2.2 Flow Field Simulation of Non-Uniform Porosity Model	104
7.3 Chapter Summary	116
References	117

第1章 绪 论

1.1 地下工程通风概述

当前,工业城市人口集中,地面建筑鳞次栉比,环境污染日益严重,工厂和服务业的扩展往往受到场地的限制。有的国家地处高寒地带,立足于防寒和节约资源,各种工程逐步向地下发展。所以近年来,国内外在大搞高层地面建筑物的同时,也积极向地下空间扩展,地下工程的进展日新月异。目前,地下工程除一般的地下铁路、隧道、仓库外,已发展到多层地下室、地下街道等建筑和构筑物,在地下修建了工厂、医院、商店、饭店,甚至发电厂。这不仅节约了城市建设用地,充分利用了地下空间,而且从战略上讲,也有着防止被战争破坏的意义。21世纪是地下工程的世纪,开发和利用地下工程是一种必然选择。

地下空间与地上空间相比具有恒温、恒湿、隔热、遮光、气密、隐蔽和安全等诸多优点,但同时也具有地下空间相对封闭,与地表联系通道很少等特点,而且地下工程在开挖和掘进过程中,一般都必须进行爆破作业。爆破后所产生的炮烟是多种有毒气体的混合物,加之人员呼出的二氧化碳(CO_2),人体新陈代谢所散发的汗味和臭气,内燃机排放的尾气,蓄电池充放电时产生的氢气(H_2)以及地下岩层中涌出的有毒有害气体等,都要用通风的方法加以稀释排除。空气的温度、湿度和风流速度三者综合起来被称为气象条件,人员对地下工程的气象条件有一定的要求。因为地下工程的人员和设备不断散发热量和湿量,或因为地热、矿岩氧化热使地下空气温度升高;或因为地下阴凉,巷壁渗水,夏季地表的热空气进入地下而凝结成露;或因无风而感到憋闷;或风速过大,使人体散热过快而颤抖,这些因素使地下工程中的空气温度、湿度和风流速度都在不断地发生变化。当气象条件发生显著变化时常使人有不舒适的感觉,为了保证人员舒适,防止机械设备和物质腐蚀损坏,必须通过通风进行散热、除湿和必不可少的空气调节。

人离不开氧气。由于人员呼吸、设备耗氧,或由于地下工程内有从地层中涌出的气体而造成缺氧的状态,若地下工程与地面隔绝,则工作地点的空气含氧量会逐渐降低。为保证人员安全健康,必须用通风的办法向地下工程不断地输入新鲜空气。风流的运动规律是空气由压力高的地方流向压力低的场所。地下工程通风就是利用工程内外空气压力之差,促进空气按所需的方向和数量流动的一种技术措施。地下工程通风的基本任务就是:向地下各工作地点供给足够数量的新鲜空气,稀释和排除各种有害物质(包括炮烟、有害气体和粉尘),调节工程内部的

气象条件,创造舒适的劳动环境。地下工程的通风,按驱使空气流动的动力不同,可分为自然通风和机械通风。自然通风是借助大气风向、出入口高程差、工程内外温度差等自然因素产生的风压来驱使空气流动的。如果充分利用地形,或加大地下工程出入口的高度差,注意洞口朝向,或利用地下车间余热所形成的坑内外温差,由自然风压造成的风量也是很可观的。但是,自然通风受地面大气的风向、风速、温度和地形、地物、工程深度、出入口高差,以及坑内温度等多种因素的影响,波动范围较大(不仅一年四季变化很大,就是昼夜之间也大有差异)而且自然通风形成的风压较小,对于深度、规模较大的地下工程,单独依靠自然通风是不可行的。在多数情况下,必须采用机械通风。总之,地下工程通风不仅是地下工程的重要组成部分,而且也是必不可少的劳动保护措施,还是改善地下环境的安全技术手段,对保护建造期间作业人员以及运营期间的人员健康与安全,以及发展地下工程都有着重要的现实意义。

1.2 公路隧道通风概述

公路建设的大力发展推动着公路隧道的快速发展,同时隧道规模也不断大长化。20 世纪 90 年代,我国建成了缙云山隧道、中梁山隧道、二郎山隧道和华蓥山隧道,标志着我国公路隧道的长度突破了 3km。21 世纪初,我国建成了全长 18.4km 的秦岭终南山隧道,这是我国公路隧道建设史上一个新的里程碑。公路隧道建设日益更新,隧道通风方式也不断优化。长大隧道通风系统的运营费用可达工程造价的 20%~30%^[1]。因此,通风方案和通风系统运营效果的优劣,将直接对隧道的运营环境及效益、隧道发生事故时的救灾功能,以及隧道的工程造价产生影响^[2, 3]。

隧道中行驶的机动车排放的大量废气中,包含多种有害物质,如 CO、CO₂ 和烟雾颗粒等,不仅威胁着人们的健康,也污染了隧道内的空气。由于隧道的空间相对密闭^[4],污染气体向隧道外扩散较慢,容易大量聚集在隧道内。废气中烟雾含量较高时,易使隧道内的能见度降低,从而对行车安全产生影响。与此同时,废气中的 CO 易与血红蛋白中的 Hb 相结合,生成结合力较强的 CO-Hb,影响血液运输氧气的能力,并且 CO-Hb 的饱和度一旦超过了 10%,就会引起不同程度的中毒症状^[5]。因此,需要采取适当的通风措施,以确保隧道正常运营时能够及时排出污染气体,从而保证隧道内有足够的新鲜空气。此外,隧道通风系统也兼顾着隧道发生火灾时的防排烟功能。由于隧道的结构复杂、环境封闭,发生火灾时,烟雾蔓延较快,使得周围气体的温度升高,形成的热量不易消散。因此,合理的通风方式对隧道意义重大,不仅可以把火灾产生的烟雾和热量及时排放到隧道外,同时也能不断向隧道内补给新鲜空气,从而最大限度降低人员的伤亡及火灾产生

的危害。

公路隧道常用的通风方式基本可分为两种,即自然通风和机械通风^[2]。隧道发展初期,公路隧道短且交通量少,通风方式采用自然通风,仅仅依靠自然风和车辆行驶时产生的交通风来实现隧道内的空气更新。随着汽车事业的发展,交通量逐渐增多,同时公路隧道的长度也不断加大,致自然通风已经满足不了需求,机械通风被广泛应用于隧道中。根据风流在隧道内的流动形式,机械通风又可以分为全横向通风系统、半横向通风系统和纵向通风系统^[6~8],其通风示意图如图 1-1 所示。

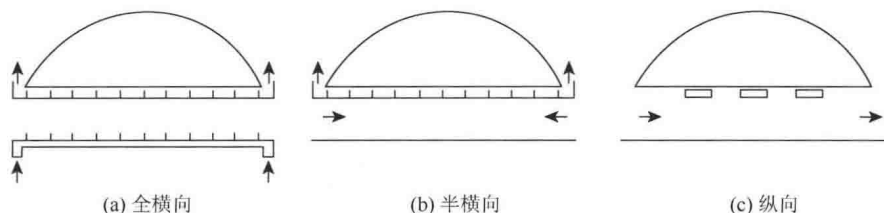


图 1-1 公路隧道通风方式

全横向通风方式是把隧道全长划分为若干区间,沿隧道两侧布置通风孔,隧道外的新鲜空气由其中一侧的送风道进入,流向各个通风孔洞,而后均匀地横向流入隧道空间内,稀释隧道内有害气体和烟尘后,再从隧道的另一侧排出,最后由通风渠排放到隧道外。此种通风方式的主要特点是:各区段之间流体流动互不影响,无纵向气流,有利于提高人的舒适感和防火;充分利用新鲜空气,隧道内废气浓度均匀,可见度最佳,通风效果好;能适应较长的隧道。早期的机械通风方式都是全横向通风方式。由于全横向通风方式的造价较高,一般用在隧道内废气较难排出的双向行车的长隧道中,尤其是双向交通的城市隧道。此外,交通拥挤的隧道中也常使用此种通风方式^[7]。

半横向通风方式是一种介于全横向通风方式与纵向通风方式之间的通风方式。正常运营时,隧道外的新鲜空气由洞口进入到通风渠,经过通风渠沿线的各个通风孔洞进入到隧道内,稀释有害气体和烟尘后,再由隧道两端排出;或是新鲜空气由隧道一端或两端的洞口进入隧道中,稀释有害气体和烟尘后,再由通风渠沿线的各个通风孔洞进入到通风渠内,经通风渠排出隧道外^[8]。此种通风方式的主要特点是:行车过程中交通活塞风不能得到有效利用;工程结构复杂,投资成本及运营、管理费用比全横向通风方式低;火灾发生时,送风机逆转,可吸出隧道内的烟气,并且关闭其他送风口闸门,仅仅打开火灾点附近的闸门可阻止火灾在隧道内蔓延。虽然半横向通风方式的成本降低,但其仍高于纵向通风方式的成本,并且施工难度大,交通活塞风得不到有效利用。因此,半横向通风方式通

常也是用于双向行车且交通拥挤的长隧道中,或是用于中部使用全横向式通风系统的隧道两端^[7]。

纵向通风方式是隧道外部的新鲜空气由隧道一端的洞口进入到隧道中,稀释有害气体和烟尘后,再由隧道另一端的洞口排出。其主要特点是:工程量小,无需额外建设通风风道,风压损失较小;交通活塞风得到有效利用,在一定程度上节约了能源;工程成本及运营费用低;火灾发生时,可根据情况调整射流风机的方向,以利于人员及时撤离隧道,同时排出隧道内的烟雾^[8]。由于纵向通风方式有诸多优点,且其相较于全横向和半横向通风方式降低了工程的难度和成本,因此广泛运用于隧道工程中。

纵向通风方式常见有三种形式,即射流风机式、竖井送排式和集中排出式,其通风示意图如图 1-2 所示。射流风机式因其投资成本低,布置灵活方便,而广泛应用于城市隧道中。竖井送排式和集中排出式可有效降低隧道洞口的污染物浓度,减少有害气体对隧道洞口外部周围环境的污染,广泛运用于长大隧道。

随着隧道的发展,满足长大隧道内的空气品质要求已不能单靠一种通风模式,混合通风方式便应运而生。混合式通风分别设置了隧道正常运营时和发生火灾时两种通风方式,正常运营阶段采用纵向通风方式通风换气,发生火灾时采用横向通风方式排烟,因其造价相对较高,目前主要应用于特长隧道中^[9]。

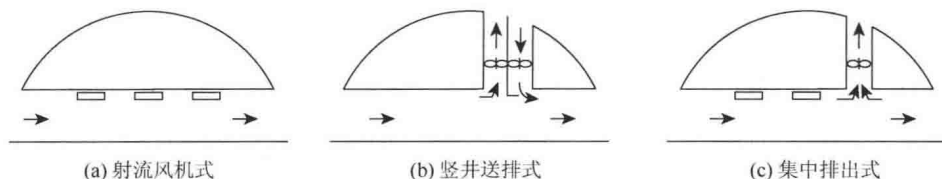


图 1-2 不同纵向通风方式

公路隧道通风方式的多样性吸引了大量学者的目光,针对隧道通风的研究也多种多样。国内外学者不仅研究了隧道内部不同通风方式的通风效果,以及隧道内部不同运营情况下的通风效果,也研究了隧道内及隧道洞口外气体扩散的情况。正是国内外研究学者的不懈努力,推动着公路隧道通风方式的不断更新。

国内外学者对隧道通风的研究主要集中在以下方面:正常运营情况下各种通风方式对隧道内空气品质的影响;发生火灾情况下各种通风方式排出隧道内烟气的效率及效果;隧道洞口处或竖井、斜井排气口处废气向外部扩散的情况。研究的方法主要有理论计算、模型试验、实地测量和数值模拟^[10]。

国外对隧道通风的研究起步较早,技术也较为成熟,研究成果较多。

在理论研究方面,Yoon 等采用热动力的计算方法,计算了在冬、夏季时自然通风情况下,韩国某一座长大隧道的风压,通过分析计算,得出了影响竖井自然

通风风压的最主要因素是隧道内外温差以及竖井高度的结论^[11]。Ohashi 等计算了日本 Kan-etsu 公路隧道内 (10.885km) 污染物浓度沿隧道纵向分布的情况, 其研究成果不仅为控制隧道的空气污染提供了参考, 也为长大公路隧道的通风设计提供了依据^[12]。为了计算隧道洞口的污染物浓度分布情况, Oettl 等提出了一种方法, 即后来被作为经验算法的拉格朗日变量算法^[13]。

在实验研究及实地测量方面, Rohne 在某一平板附近布置了风机, 通过实验, 研究了射流风机的推力和风机附近平板所受的阻力, 得出了平板所受阻力与风机推力之比主要取决于风机离平板的距离及风机的安装间距的结论^[14]。Tabarra 等按 1:5 的比例做了隧道的模型, 通过实验研究了不同工况下火灾烟雾的扩散情况, 其结果与 CFD 模拟的结果较吻合^[15]。Martegani 等进行了风机实验, 研究了风机升压力以及风机流场受射流风机喷口样式影响的情况, 通过实验, 他们认为风机的喷口处安装有导叶皮管时, 才能较好地模拟出风机的实际流场。此项研究为风机模型实验提供了参考依据^[16]。Sambolik 将模型实验与实地测量相结合, 研究了在自然通风情况下, 不同车速的模型汽车在仅有压力差形成的进风量时, 通风的风量和风速可达到的上限值, 并验证了自模区存在临界雷诺数^[17]。Mizuno 等将实验与数值模拟相结合, 研究了不同型号风机的折损系数, 主要分析了风机的折损系数受隧道进风口风速大小以及风机纵向安装间距大小影响的程度^[18]。Mutama 等进行了风洞实验, 分析研究了射流风机的流动特性^[19]。Caliza 等通过模型实验研究了隧道通风的摩擦因素, 得出了隧道内气体的流动受粗糙高度、通风孔横截面, 以及流体流动方向影响的结论^[20]。Ide 等通过实验研究了隧道洞口污染物扩散的情况, 得出了扩散的基本机理, 并提出了几种扩散模型^[21]。Brouses 等按 1:140 的比例把 St. Denis station 附近的环境做成模型以进行风洞试验, 测出了污染物浓度分布随时间变化的数据^[22]。

在数值模拟方面, Okamoto 等对日本的两个公路隧道洞口建立了三维数值模型, 分析了洞口的空气质量, 并进行了示踪剂扩散实验, 以验证数值模拟的计算精度^[23]。Brandeis 等采用二维数值模拟的方法, 研究了火灾时各种通风方案的通风情况^[24]。Hwang 等运用大涡模拟的方法, 分析了火灾发生源的几何结构、隧道内部结构, 以及可燃物的类型对火灾临界风速的影响^[25]。Demouge 等运用 CFD 软件建立了三维模型, 分析了火灾情况下横向通风时隧道内的烟气流动情况^[26]。Vega 等以一座长 853m 的双洞口隧道为原型, 进行了三维数值模拟, 分析了不同火灾工况下隧道壁面温度沿程变化情况, 以及隧道内 CO 浓度沿程变化情况, 并将计算值与实验数据进行对比^[27]。Levy 等采用三维 CFD 软件模拟的方法对隧道火灾工况进行瞬态模拟, 分析了排风量对烟气控制效果的影响^[28]。Betta 等运用 CFD 软件, 模拟了隧道内交通阻滞时、无车辆行驶时以及火灾发生时三种工况下隧道内的通风状况, 得出了隧道内压力的增加以及火灾时隧道内的温度都受射流风机安装倾

斜角 ($0^{\circ} \sim 10^{\circ}$) 影响的结论^[29]。

我国对隧道通风的研究虽然起步较晚,但还是取得了一定的进展和成果。

在理论方面,高孟理等分析研究了射流风机的增压特性和射流特性,利用线性回归的方法得出了风机升压力和诱导段长度之间的函数关系式,以及风机升压力和风机组纵向间距之间的函数关系式^[30, 31]。胡宇峰等研究了隧道内的气流运动以及污染问题,使用了一种工程估算的方法来计算隧道内的气体流动及污染物分布情况,此估算方法被证实有效;此外,他还得出了通风竖井使用不当会抑制污染气体向隧道外扩散的结论^[32]。王晓雯等基于理论公式,分析研究了隧道内通风效果受摩阻损失的影响情况,后来基于热力学和流体力学的基本原理,建立了隧道内烟气流的临界速度、风压的数学计算模型^[33, 34]。钟星灿等基于一维恒定流模型,得出了开孔自然通风的计算方法,并且认为阻滞工况时隧道顶部开口的排气动力是车辆散发热量时形成的热压^[35]。基于顶部开口自然通风的公路隧道模型实验,朱培根等研究了该实验的相似性问题,建立了可以较好描述竖井自然通风型城市隧道内流速场的数学模型,后来他又研究了此类自然通风的原理以及气流在隧道内的流动特征,建立了描述隧道内污染气体浓度分布的数学模型^[36, 37]。戴国平等研究了公路隧道中射流风机的应用及选型,并比较了可逆风机与单向风机的通风效果^[38]。

在实验研究及实际测量方面,蒋维楣等进行了风洞实验,研究了城市隧道风井口处污染物扩散的情况并建立了经验公式,该公式可用于计算风井排放口处污染物的浓度^[39]。钟汉枢等通过实地测量大宝山隧道的通风情况,为纵向射流通风隧道内通风控制以及射流风机的安装布设提供了可靠的数据资料^[40]。Chen 等进行了模型实验,研究了交通活塞风在单、双向交通,以及不同车速、不同车间距情况下的分布^[41]。薛运祝对竖井通风的硐石隧道进行了现场测试,分析了隧道出口中段一个处于 $15 \sim 70\text{m}$ 高度范围内的竖井对自然通风效果的影响,根据测量数据,得出了竖井长度的缩短,以及竖井断面积的增大都有利于增大竖井流量比的结论^[42]。

在数值模拟方面,徐琳等基于 CFD 软件,分析了火灾热释放率、环境温度以及隧道的断面形状对发生火灾时临界风速产生的影响^[43]。王永东等基于组合结构法进行了数值模拟,模拟了多种长大公路隧道的通风方式,并对比计算结果以确定最佳通风方式^[44]。余斌等数值模拟了隧道洞口污染气体的对流扩散,预测分析了污染气体的扩散情况并揭示了不同风速和风向,污染气体的扩散特征^[4, 45]。还有多名学者基于数值模拟取得了一定的研究成果^[46~48]。

上述国内外的研究学者已为隧道通风的研究奠定了坚实的基础,而近年来相关方面的研究也与实际工程日益紧密。文献[49]~文献[57]是近年有关隧道通风的部分研究,其中多数研究内容是与实际工程相结合,解决了实际工程中的一些问