

UNDERGROUND ENGINEERING
VENTILATION AND DISASTER PREVENTION

地下工程

通风与防灾

郭 春 / 编著
王明年 / 主审



西安交通大学出版社

地下工程通风与防灾

郭 春 编著
王明年 主审

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

地下工程通风与防灾 / 郭春编著. —成都: 西南
交通大学出版社, 2018.3
ISBN 978-7-5643-5996-6

I. ①地… II. ①郭… III. ①地下建筑物—通风—高
等学校—教材②地下建筑物—防灾—高等学校—教材
IV. ①TU96

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 320910 号

地下工程通风与防灾

郭 春 编著

责任编辑	杨 勇
封面设计	墨创文化
	西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	10.5
字 数	249 千
版 次	2018 年 3 月第 1 版
印 次	2018 年 3 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-5996-6
定 价	32.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

在公路隧道、铁路隧道、地下储库、地下室等地下工程建设期，施工通风系统是不可缺少的技术环节。在机械化作业情况下，施工通风不仅为洞内施工地点供给新鲜空气、排除粉尘和各种有毒有害气体，创造良好的劳动环境，保障施工人员的健康与安全，而且是维持机电设备正常运行的必要条件。目前，特长隧道及复杂地下工程大量涌现，人员劳动保护意识不断增强，地下工程施工通风效果的好坏直接影响到整个施工过程的空气质量，进而影响到各个作业面施工人员的人体健康，因此，施工通风这一从前未被重视的辅助施工措施，显示出越来越重要的地位，甚至直接影响到工程方案的决策。

在地下工程运营期间，火灾事故时有发生，严重威胁乘客的生命财产安全，甚至造成巨大的社会影响和经济损失。由于隧道环境的封闭性，火灾时排烟与散热条件差，温度高，会很快产生高浓度的有毒烟气，致使人员疏散困难，救灾难度大，破坏程度严重。

地面交通拥堵、空间匮乏、环境污染及能源消耗等原因加快了地下空间的开发利用，随着多年发展，地下空间不再仅开发作为交通设施使用，还被开发作为地下商场、地下停车场、人防工程等设施。地下空间是一个相对密闭的空间，合理的通风才能保证其正常顺畅的运营及确保地下空间内人员的健康安全。

地下空间与地上建筑空间相比，由于功能设施的多样性、空间环境的封闭性、地势的低洼性和自然条件的不良性，容易发生灾害事故。地下空间存在的风险主要包括火灾、水灾、恐怖袭击、地下空间犯罪、污染及有毒化学品泄漏、食品污染、供电故障等。其中火灾是地下空间人为事故风险中发生频次最高、危害最为严重的灾害，地下空间内火灾事故几乎占了事故总数的 1/3。特别是近 20 年来，地下空间风险事件的灾害形式呈现多发性和突发性、多样化和严重化的特点。因地下空间具有封闭狭小、出入口少、通风光线条件差等特性，一旦发生风险信息反馈缓慢，这使得地下空间的防灾救援更显得重要。

本书对地下工程领域的多类型工程，如公路隧道、铁路隧道、地铁、地下储库、地下室等，在设计、施工、运营全生命周期内必需的通风、防灾内容进行了梳理与归纳总结，并将已有的知识内容与作者前期的多项科研成果相结合，完善了地下工程通风与防灾体系。

本书是普通高等院校土木工程大类地下工程专业方向及城市地下空间工程专业本科

生、研究生的教科书，也可供地下工程设计、施工、运营管理等技术人员参考。

本书共分 9 章，第 1 章地下工程施工通风，第 2 章公路隧道运营通风，第 3 章铁路隧道运营通风，第 4 章地铁通风空调，第 5 章其他地下空间运营通风，第 6 章公路隧道防灾救援，第 7 章铁路隧道防灾救援，第 8 章地铁防灾救援，第 9 章其他地下空间防灾救援。

在编写本书的过程中，编者吸收了以前诸多教材的优点，参阅了国内外近年来发表的科技文献，在此特向文献作者们表示感谢。虽然我们尽了很大努力，但由于学识水平有限，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 9 月

目 录

第 1 章	地下工程施工通风	001
1.1	地下工程施工环境中的卫生标准	001
1.2	自然通风	006
1.3	基本的机械通风方式	010
1.4	常见隧道及辅助坑道条件下的通风方式	013
1.5	施工通风计算	028
1.6	施工通风设备与选择	034
	习 题	042
第 2 章	公路隧道运营通风	043
2.1	公路隧道运营的卫生标准	043
2.2	需风量计算	044
2.3	通风方式及选择	048
	习 题	057
第 3 章	铁路隧道运营通风	059
3.1	铁路隧道运营的卫生标准	059
3.2	需风量计算	060
3.3	运营通风方式及选择	062
	习 题	067
第 4 章	地铁通风空调	068
4.1	地铁通风空调系统概述	068
4.2	地铁通风空调系统组成	069
4.3	地铁车站内部通风系统	074
4.4	地铁通风空调系统运行状态	079
4.5	地铁通风空调系统负荷计算	080
	习 题	083
第 5 章	其他地下空间运营通风	084
5.1	地下商场运营通风	084
5.2	地下停车场运营通风	087
5.3	矿井运营通风	089

5.4	人防工程运营通风.....	093
习 题		095
第 6 章	公路隧道防灾救援.....	097
6.1	公路隧道火灾特性.....	097
6.2	公路隧道火灾通风力计算及烟流控制标准.....	100
6.3	单座隧道防灾救援体系.....	109
6.4	隧道群防灾救援体系.....	117
6.5	公路隧道火灾预防技术.....	119
习 题		124
第 7 章	铁路隧道防灾救援.....	125
7.1	铁路隧道防灾救援发展.....	125
7.2	救援疏散设施.....	126
7.3	隧道防灾通风方案设计.....	127
7.4	通风设备布置.....	130
7.5	防灾救援风速、风量设计.....	132
7.6	通风专业与其他专业接口.....	133
习 题		133
第 8 章	地铁防灾救援.....	134
8.1	地铁火灾概述.....	134
8.2	地铁火灾自动报警.....	137
8.3	地铁应急疏散逃生通道技术.....	142
习 题		145
第 9 章	其他地下空间防灾救援.....	146
9.1	地下商场防灾救援.....	146
9.2	地下停车场防灾救援.....	149
9.3	矿井防灾救援.....	152
9.4	人防工程防灾救援.....	155
习 题		158
参考文献		159

第 1 章 地下工程施工通风

【本章重难点内容】

- (1) 地下工程施工环境的卫生标准。
- (2) 自然风流与常见的自然通风。
- (3) 基本的机械通风方式。
- (4) 常见隧道及辅助坑道的通风方式。
- (5) 施工通风量、管网漏风、通风阻力计算方法。

1.1 地下工程施工环境中的卫生标准

在隧道施工中，不可避免的会产生一些有害物质，并排放到隧道空气中，造成对隧道空气的污染，会对隧道内作业人员的健康产生损害。这些有害物质可分为气体、粉尘和噪音三大类。常见的有害气体主要包括一氧化碳、二氧化碳、一氧化氮、二氧化氮、二氧化硫、硫化氢和瓦斯等。

1.1.1 行业卫生标准

为了保护地下施工人员的健康，保证安全生产，我国相关行业都对地下施工作业环境的卫生标准做了明确的规定。

1. 现行《铁路隧道施工规范》规定的卫生标准

铁路隧道施工目前执行的是铁道部 2002 年 3 月发布的《铁路隧道施工规范》（TB 10204—2002），其中对隧道中空气的氧气含量、粉尘浓度、有害气体浓度、温度和噪声等都做了明确的规定，要求在隧道施工过程中作业环境应达到如下标准：

(1) 空气中氧气含量，按体积计不得小于 20%。

(2) 粉尘容许浓度，每立方米空气中含有 10% 以上的游离二氧化硅的粉尘不得大于 2 mg。

(3) 瓦斯装药爆破时，爆破地点 20 m 内，风流种瓦斯浓度必须小于 1.0%；总回风道风流种瓦斯浓度应小于 0.75%；开挖面瓦斯浓度大于 1.5% 时，所有人员必须撤至安全地点。

(4) 有害气体最高容许浓度：一氧化碳最高容许浓度为 30 mg/m³，在特殊情况下，施工人员必须进入工作面时，浓度为 100 mg/m³，但工作时间不得大于 30 min；二氧化碳按体积计不得大于 0.5%；氮氧化物（换算成 NO₂）为 5 mg/m³ 以下。

(5) 隧道内气温不得高于 28 ℃。

(6) 隧道内噪声不得大于 90 dB。

2. 现行《公路隧道施工技术规范》规定的卫生标准

公路隧道施工目前执行的是交通运输部 2009 年 9 月发布的《公路隧道施工技术规范》(JTGF60—2009),其中对隧道中空气的氧气含量、粉尘浓度、有害气体浓度、温度和噪声等都做了明确的规定,要求在隧道施工过程中作业环境应达到如下标准:

(1) 隧道空气中,氧气含量按体积计不应小于 20%。

(2) 隧道内气温不宜大于 28℃。

(3) 噪声不应大于 90 dB。

(4) 粉尘浓度,每立方米空气中含有 10%以上的游离二氧化硅的粉尘不得大于 2 mg。

(5) 有害气体浓度:一氧化碳一般情况下不大于 30 mg/m³,特殊情况下施工人员必须进入工作面时,可为 100 mg/m³,但工作时间不得超过 30 min;二氧化碳按体积计不得大于 0.5%;氮氧化物(换算成 NO₂) 在 5 mg/m³ 以下。

(6) 瓦斯隧道爆破时,爆破地点 20 m 以内,风流中瓦斯浓度必须小于 1.0%;总回风道风流中瓦斯浓度小于 0.75%;开挖面瓦斯浓度大于 1.5%时,所有人员必须撤至安全地点。

3. 现行《煤矿安全规程》规定的卫生标准

现行《煤矿安全规程》于 2015 年 12 月 22 日由国家安全生产监督管理总局第 13 次局长办公会议审议通过,自 2016 年 10 月 1 日实行。该规程规定的卫生标准为:

(1) 采掘工作面的进风流中,氧气浓度不低于 20%,二氧化碳浓度不超过 0.5%。

(2) 有害气体的浓度不超过表 1-1 规定。

(3) 甲烷、二氧化碳和氢气的允许浓度按本规程的有关规定执行。

表 1-1 瓦斯有害气体最高允许浓度

名 称	最大容许浓度/%	名 称	最大容许浓度/%
一氧化碳 CO	0.002 4	硫化氢 H ₂ S	0.000 66
氧化氮(换算成二氧化氮 NO ₂)	0.000 25	氨 NH ₃	0.004
二氧化硫 SO ₂	0.000 5		

4. 现行《金属非金属矿山安全规程》规定的卫生标准

现行《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2006)由国家安全生产监督管理总局 2006 年 6 月发布,该规程规定的地下矿井的卫生标准为:

(1) 井下采掘工作面进风流中的空气成分(按体积计算),氧气应不低于 20%,二氧化碳不应高于 0.5%。

(2) 入风井巷和采掘工作面的风源含尘量,应不超过 0.5 mg/m³。

(3) 进下作业地点的空气中,有害物质的接触限值应不超过 GBZ 2 的规定。

(4) 含铀、钍等放射性元素的矿山中,井下空气中的氡及其子体的浓度应符合 GB 4792 的规定。

5. 现行《冶金地下矿山安全规程》规定的卫生标准

原冶金工业部、原中国有色金属工业总公司、原劳动部 1990 年 4 月颁发《冶金地下矿山安全规程》,对井下卫生标准做了如下规定:

(1) 井下采掘工作面进风流中的空气成分,氧气含量按体积计不得低于 20%,二氧

化碳含量按体积计不得高于 0.5%。

(2) 井下所有作业地点的空气含尘量不得超过 2 mg/m^3 ，入风井巷和采掘工作面的风源含尘量不得超过 0.5 mg/m^3 。

(3) 井下作业地点（无柴油装备的矿井），有毒有害气体的浓度不得超过表 1-2 的规定。

(4) 使用柴油机设备的矿井，井下作业地点有毒有害气体的浓度应符合下列规定：一氧化碳小于 60 mg/m^3 ，氧化氮含量小于 10 mg/m^3 ，甲醛小于 6 mg/m^3 ，丙烯醛小于 0.6 mg/m^3 。

(5) 采掘工作面的空气温度不得超过 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；热水型矿井和高硫矿井的空气温度不得超过 $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(6) 作业场所空气中的粉尘浓度应符合《工业企业设计卫生标准》（TJ 36）的有关规定。

表 1-2 冶金矿井有害气体最高容许浓度

名 称	最大容许浓度 / (mg/m^3)	名 称	最大容许浓度 / (mg/m^3)
一氧化碳 CO	30	硫化氢 H_2S	15
氧化氮（换算成二氧化氮 NO_2 ）	5	氨 NH_3	10

1.1.2 国家卫生标准

国家卫生标准主要包括《工业企业设计卫生标准》（GBZ 1—2015）、《工作场所有害因素职业接触限值 第一部分：化学有害因素》（GBZ 2.1—2007）和《工作场所有害因素职业接触限值 第二部分：物理因素》（GBZ 2.2—2007）。

关于作业场所有害气体的容许浓度包含在《工作场所有害因素职业接触限值 第一部分：化学有害因素》（GBZ 2.1—2007）中，它对 339 中化学物质和 47 中粉尘的容许浓度做了规定。与隧道施工作业环境有关的几种化学物质（有害气体）容许浓度见表 1-3，粉尘容许浓度见表 1-4。

表 1-3 隧道工作场所空气中化学物质容许浓度

序号	中文名	化学文摘号 (CAS No.)	OELs/ (mg/m^3)		
			MAC	PC-TWA	PC-STEL
1	一氧化碳	630-08-0			
	非高原		—	20	30
	高原				
	海拔 2 000 ~ 3 000 m		20	—	—
	海拔 > 3 000 m		15	—	—
2	一氧化氮	10102-43-9	—	15	—
3	二氧化氮	10102-44-0	—	5	10
4	二氧化硫	7446-09-5	—	5	10
5	硫化氢	7783-06-4	10	—	—
6	二氧化碳	124-38-9	—	9 000	18 000

表 1-4 隧道工作场所粉尘浓度

序号	中文名	化学名摘号 (CAS No.)	PC-TWA/ (mg/m ³)		备注
			总尘	呼尘	
1	矽尘	148080-60-7			GI (结晶型)
	10%≤游离 SiO ₂ ≤50%		1	0.7	
	50%<游离 SiO ₂ ≤80%		0.7	0.3	
	游离 SiO ₂ > 80%		0.5	0.2	

其中化学物质职业接触限值 (OEL) 包括时间加权平均容许浓度 (PC-TWA)、短时间接触容许浓度 (PC-STEL) 和最高容许浓度 (MAC) 三个指标, 粉尘的容许浓度仅包括时间加权平均容许浓度 (PC-TWA) 一个指标。

时间加权平均容许浓度 (PC-TWA) 是指以时间为权数规定的 8 h 工作日、40 h 工作周的平均容许接触浓度。

短时间接触容许浓度 (PC-STEL) 是指在遵循 PC-TWA 前提下容许短时间 (15 min) 接触的浓度。

最高容许浓度 (MAC) 是指工作地点、在一个工作日内、任何时间有毒化学物质均不应超过的浓度。

1.1.3 国外标准

1. 美国

美国工业卫生学家委员会及 6 个学术团体推荐了职业接触限值。美国劳工部职业安全与卫生署 (OSHA) 在 Federal Register (联邦年鉴) 上公布职业有害因素的容许接触限值 (Permissible Exposure Limits, PELs), 经公众评议修正后, 在第 29 卷“联邦法典”中正式颁布, 作为强制执行的作业场所卫生标准。

美国劳工部职业安全与卫生署 (OSHA) 发布的强制性职业接触限值达 650 余种, 表 1-5 列出了与隧道施工作业环境有关的强制性职业接触限值。

表 1-5 美国隧道施工作业环境有关的强制性职业接触限值

化学物质	化学名摘号 (CAS No.)	PELs ^①	
		/ppm ^②	/ (mg/m ³ ^③)
二氧化碳	124-38-9	5 000	9 000
一氧化碳	630-08-0	50	55
硫化氢	7783-06-4	—	见表 1-6
二氧化氮	10102-44-0	5 ^④	9 ^④
二氧化硫	7446-09-5	5	13

注: ① PELs (除非另行注明) 均为 8 h 的 TWAs。

② 25 ℃、760 mmHg 大气压下的蒸汽或气体的体积的 10⁻⁶ 浓度。

③ 浓度单位为 mg/m³。

④ 表示的是上限值。

表 1-6 美国隧道施工作业环境有关的强制性职业接触限值附表

化学物质	8 h 加权平均值	可接受的上限浓度	超过可接受上限浓度时 8 h 一次可接受极限值	
			浓度	最长持续时间
硫化氢	—	20 ppm	50 ppm	10 min, 不得已的情况下

2. 德 国

德国联邦劳动和社会事务部发布的工作场所化学物质卫生标准，分为最高容许浓度（MAK）和生物耐受值（BTA）两大部分。MAK 通常为一个工作日或工作班内浓度测定的平均值，而非一次测定值。BTA 也是按一般情况下每天最多接触 8 h，每周 40 h 而制定的。另外，标准还对化学物质的接触上限做了明确的规定，接触上限分为短时间平均值和瞬时值。

1996 年制定的 MAK 的化学物质数量有 700 种，1996 年制定 BTA 的化学物质数量有 44 种。表 1-7 列出与隧道施工作业环境有关的化学物质 MAK。表 1-8 是与表 1-7 对应的化学物质接触的上限。

表 1-7 德国隧道工作场所化学物质标准

化学物质 [CAS 号]	MAK 值		接触 上限	H : S S (P)	致癌物 质分类	孕期 毒性	遗传 毒性	蒸汽压 /(hPa/20 °C)
	/ (mL/m ³)	/ (mg/m ³)						
一氧化碳 [630-8-0 号]	30	33	II.1			B		
二氧化碳 [124-38-9 号]	5 000	9 000	IV					
二氧化硫 [7746-09-5 号]	2	5	I					
硫化氢 [7783-6-4 号]	10	14	V			II c		
二氧化氮 [10102-44-0 号]	5	9	I					

表 1-8 德国化学物质的接触上限

类别	接触上限		每工作班允许接触的 最多次数
	MAK 倍数	持续时间	
I 局部刺激物	2	5 min, 瞬时值	8
II 2 h 内出现作用的全身毒性			
II.1 : 半减期 < 2 h	2	30 min, 平均值	4
II.2 : 半减期 2 h 至 1 个工班	5	30 min, 平均值	2
III 2 h 内出现作用的全身毒性			
半减期 > 1 个工作班 (强蓄积性)	10	30 min, 平均值	1
IV 作用很弱的物质			
MAK > 500 × 10 ⁻⁶	2	60 min, 瞬时值	3
V 有强烈气味的物质	2	10 min, 瞬时值	4

1.2 自然通风

地下工程施工的通风方式按照动力来源分为自然通风和机械通风。自然通风利用的是自然风压，而机械通风利用的是通风机产生的风压。本节只介绍自然通风，机械通风在下节中介绍。

隧道自然通风就是不用风机设备，完全依靠自然风的作用，将施工中产生的污染物排出隧道的一种方法。它不需要设备和电力，非常节省能源和运行费用，是一种理想的通风方式。但这种方法并不是可以随意利用的，它受到隧道内外温差、气象条件、辅助坑道设置、坡度等各因素的制约。要利用自然通风就需要了解它的自然规律。

1.2.1 隧道自然风流

1. 自然风流的形成

隧道内自然风流的形成包括三个方面原因，即隧道内外的温度差、进出风口高点水平气压差和隧道外大气自然风。

1) 温度差

当隧道内外温度不同时，隧道内外空气的密度就不相同，若进、出风口存在高差，就会形成压差，从而产生空气的流动，这种压差被称为热外差。当然温度差不是形成密度差的唯一因素，但密度差通常都是由温度差引起的。

2) 水平气压差

在大的范围内，不同地方气候不同，空气温度、湿度等存在差别，同一水平上的大气压也不相同，即存在水平压力差，气象学上用气压梯度来表示这种气压的差异。所谓气压梯度，就是垂直于等压线的一个向量，以子午线 1 度或 111.1 km 为一个单位距离，在每一个单位距离内气压变化的大小叫做一个气压梯度。

可以看出，气压梯度通常是针对较大范围的概念，在小范围内通常同一水平气压差别很小，可以忽略不计。但在“一年有四季，十里不同天”的山区，贯通特长隧道的进、出口外的温度和湿度通常是不同的，水平气压差就不能不考虑。

3) 隧道外的大气自然风

隧道外吹向洞口的大气自然风，碰到山坡后，其动压的一部分可转换为静压力。这部分动力的大小与大气自然风的方向和风速有关，通常按下式计算：

$$\Delta P_v = \frac{1}{2} \rho_a (v_a \cos \alpha)^2 \quad (1-1)$$

式中 ΔP_v —— 大气自然风转换动压 (Pa)；

ρ_a —— 隧道外大气自然风密度 (kg/m^3)；

v_a —— 隧道外大气自然风速 (m/s)；

α —— 大气自然风向与隧道中线的夹角 ($^\circ$)。

2. 自然风压的计算

隧道内自然风流是由隧道内外的温度差、进出口高点水平气压差和隧道外大气自然

风三种原因共同作用产生的，自然风流的风压即为三种因素所产生的压力之和。计算时既可以低洞口为基准点，也可以高洞口为基准点。如图 1-1 所示，它是隧道进口工区与竖井工区连通后的自然通风，1 点为隧道的进风口，3 点为隧道的出风口，即自然风流由 1 点进入，经过 2 点，最后由 3 点排出。隧道外的平均温度为 T_1 ，洞外的平均温度为 T_2 ，1 点的大气压为 P_1 ，3 点的大气压为 P_3 ，0~3 为高点水平线，1 点上方 0 点的大气压为 P_0 ，隧道洞口 1 点外大气自然风向与隧道中心线的夹角为 α ，以 1 点为基准点，则自然风压为：

$$H_N = \Delta P_v + (P_3 - P_0) + (\rho_{m1} - \rho_{m2})g \cdot Z \quad (1-2)$$

式中 ρ_{m1} ——0~1 点的空气的平均密度；

ρ_{m2} ——2~3 点间空气的平均密度。

右边第一项为隧道进风口外大气风流转换为静压的那部分动压，数值可根据公式 (1-1) 计算；第二项为高点 3 与 0 点的水平气压差；第三项表示的是因洞内外温度差产生的热外差，也就是两侧空气柱的重力差。

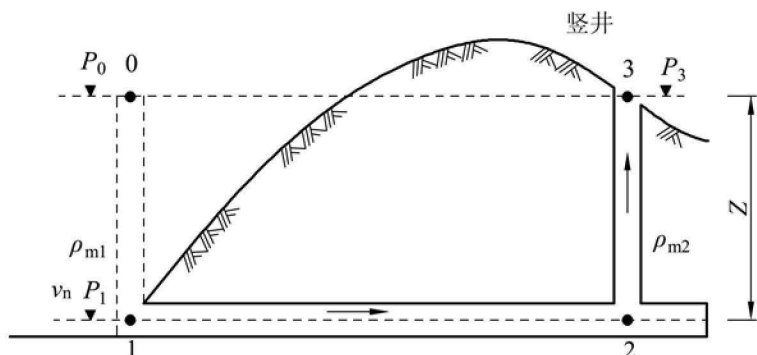


图 1-1 形成隧道自然风流的压力关系

3. 自然风压的影响因素

通常情况下，隧道外大气风流转换动压和高点水平气压对自然风压的影响不大，自然风压的大小主要取决于热位差。影响自然风压的决定性因素是两侧空气柱的密度差和高度，而空气密度除了受温度 T 的影响外，还受大气压 P 、相对湿度 φ 和空气中饱和水蒸气分压等因素影响。

(1) 两侧空气柱的温差是影响自然风压的主要因素。影响气温差的主要因素是洞外温度、进入隧道的风流量、围岩温度以及风流与围岩的热交换。其影响程度随隧道施工方式、埋深、地形、季节和地理位置的不同而有所不同。

(2) 空气成分和湿度影响空气的密度，对自然风压也有一定的影响，但影响较小。

(3) 当两侧空气密度差一定时，热位差与最高和最低点（水平）间的高差 Z 成正比。即高差越大，热位差越大。

4. 自然风量的计算

自然通风时，其能量的表现是自然通风压力 H_N ，可根据公式 (1-2) 求出。

自然风量 Q_N 是由自然通风压力和通风阻力决定的，当隧道内压力损失 $h = H_N$ 时，可

由下式求出：

$$Q_N = 60 \cdot A \cdot v \quad (1-3a)$$

$$v = \sqrt{H_N \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{2}{\rho} \cdot \frac{d_T}{L_T}} \quad (1-3b)$$

式中 Q_N ——自然通风量 (m^3/min)；
 A ——隧道断面积 (m^2)；
 v ——隧道内平均速度 (m/s)；
 λ ——隧道内壁摩擦系数；
 L_T ——隧道长度 (m)；
 d_T ——隧道当量直径 (m)；
 ρ ——隧道内空气密度 (kg/m^3)。

1.2.2 常见情况下的隧道自然通风

1. 上、下坡隧道独头施工的自然通风

隧道进、出口上下坡施工时，自然通风的形成与洞口的气候条件关系很大。

对于下坡施工的隧道，如图 1-2 所示。在冬季，一般来说，隧道内温度高于隧道外温度，外面寒冷的空气将沿着隧道下部进入隧道，隧道内含有污染物的暖空气将沿着隧道上部排出洞外，形成自然风；在夏季，隧道内温度低于洞外温度。洞外的热空气堵在隧道洞口，洞内的凉空气停滞在洞外，无法形成自然风流。

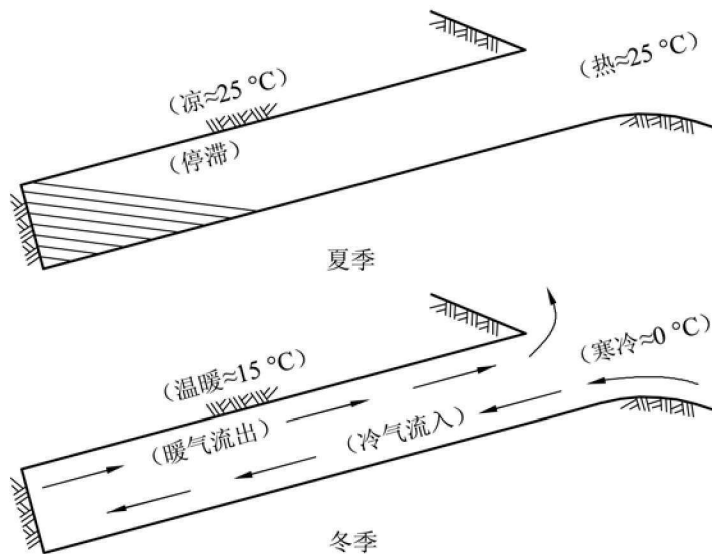


图 1-2 下坡隧道的自然通风示意图

而对于上坡施工的隧道来说，如图 1-3 所示。冬季洞外的冷空气受阻停在洞口段，难以进入工作面，洞内含有污染物的热空气受自然风压的作用，被堵在隧道工作面附近，无法出来，难以形成自然风流；夏季隧道内气温低，隧道内凉空气流向下部，外部热空气则从隧道洞口上部流入，产生自然通风作用。

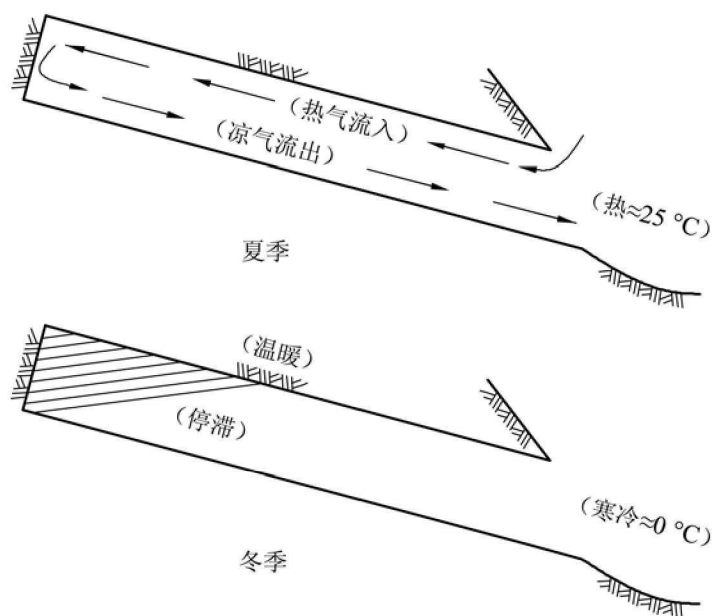


图 1-3 上坡隧道的自然通风示意图

2. 两竖（斜）井工区贯通后的自然通风

当隧道施工的两个竖（斜）井工区连通后，因两竖（斜）井的位置和深度不同，在两者之间很容易形成自然通风。自然通风系统如图 1-4 所示，2-3 线为水平隧道，0-4 线为通风系统最高点的水平线。如果把地表大气视为断面无限大，风阻为零的假想风路，则通风系统则视为一个闭合的回路。

如不考虑洞外大气自然风和 4、0 两点的水平气压差。自然风压的大小和方向主要受地面空气温度变化的影响。在冬季，地面温度很低，空气柱 0-1-2 比空气柱 4-3 重，风流由 1 号竖井的 1 流向 2，经 2 号竖井的 3、4 排至地面；夏季，地面气温高于隧道和竖井内的平均气温，空气柱 0-1-2 比空气柱 4-3 轻，使风流由 1 号竖井排出。而在春秋季节，地面气温与隧道竖井内的平均气温相差不大，自然风压很小，因此，将造成隧道风流的停滞现象。在一些山区，由于地面气温在一昼夜之内也有较大变化，所以自然风压也会随之发生变化。夜晚，1 号竖井进风；午间，又变成 1 号竖井出风。

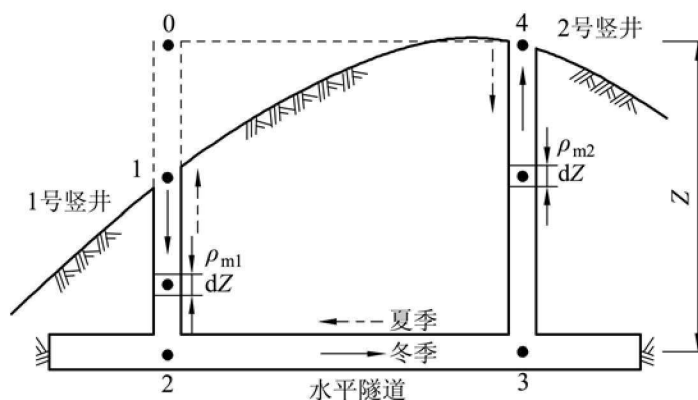


图 1-4 两个竖井工区连通后隧道自然通风示意图

3. 有通风竖井隧道的自然通风

在长独头隧道的施工中,若地形条件具备,通常会设置通风竖井,以减少独头通风长度,降低通风难度,同时在洞内外温差比较大的季节还可充分利用自然风,降低能源的消耗。

图 1-5 是有通风竖井的隧道的通风示意图。这种情况下,0 点和 3 点在山坡的同一侧,距离较近,可以不考虑高点水平大气压差和隧道外大气自然风的影响。自然风压的大小主要取决于因洞内外温差而产生的空气柱 0-1 和 2-3 的密度差,以及通风竖井的深度。即根据公式 (1-2) 就可以计算其自然风压。风量的大小则取决于通风路径 1-2-3 的风阻大小。冬季外界温度比洞内温度低,空气柱 0-1 比 2-3 的密度大,隧道自然风流由 1 点进入,由 3 点排出。夏季则正好相反。

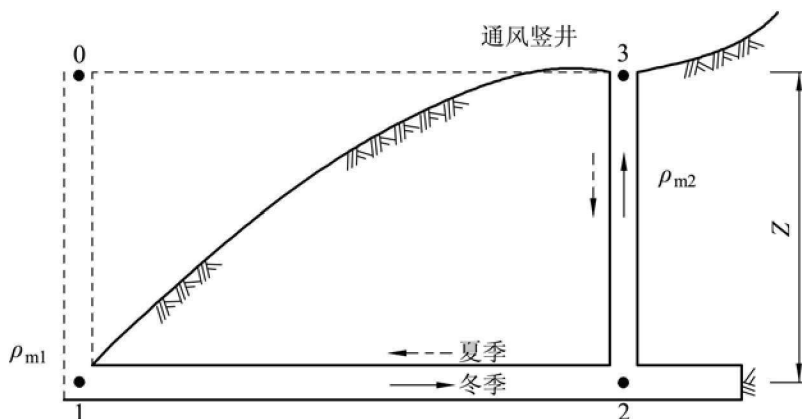


图 1-5 有通风竖井隧道的自然通风示意图

1.3 基本的机械通风方式

1. 送风式

送风式的管路进风口设在洞外,出风口设在掌子面附近,在风机的作用下,新鲜空气从洞外经管路送到掌子面,稀释污染物,污浊空气则由隧洞排至洞外,布置方式如图 1-6 所示。

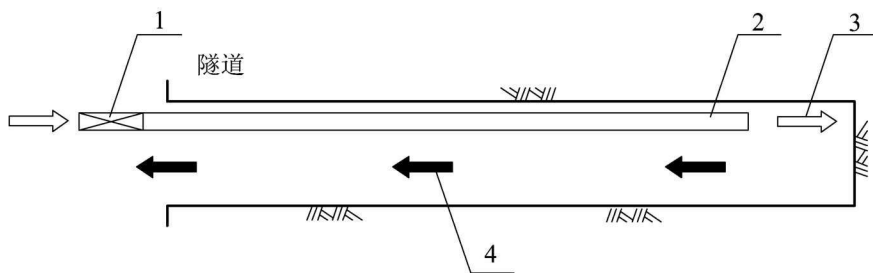


图 1-6 送风式通风示意图

1—风机; 2—排风管路; 3—新鲜空气; 4—污浊空气