

隧道施工通风与防尘

赖涤泉 编著

中国铁道出版社

1994年·北京

(京) 新登字063号

内 容 简 介

本书主要介绍：铁路、公路、水工、城市地铁等隧道施工通风的基本知识，通风设备的性能，通风系统设计计算方法，长隧道施工通风技术的最新研究成果，以及施工防尘技术。可供从事隧道施工的管理人员、技术人员阅读，也可作为有关专业大、中专教材或教学参考书。

隧道施工通风与防尘

赖涤泉 编著

中国铁道出版社出版发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 江新锡 封面设计 翟达

各地新华书店经售

北京市燕山联营印刷厂印

开本：787×1092 毫米 1/32 印张：6.125 字数：131 千

1984年7月 第1版 第1次印刷

印数：1—2500册

ISBN7-113-01730-4/TU·374 定价：6.45 元

前 言

在铁路、公路、水利、水电、工矿、国防工程和城市地铁等隧道施工中，通风是不可缺少的技术环节。在机械化作业情况下，通风不仅为洞内施工地点供给新鲜空气、排除粉尘及各种有毒有害气体，创造良好的劳动环境，从而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。因此，施工管理人员和技术人员都必须重视通风工作。

对各种长隧道施工来说，通风常常对整个工程的施工方案和施工组织设计起不可忽视的甚至决定性的作用。例如，由于通风技术的限制，往往采取开凿辅助通风坑道的方法以形成通风系统，保证主体工程的顺利进行；或者出于通风困难和工期限制方面的考虑，实施“长隧短打”的施工方案，因而相应地增加工程总量和人、财、物的投入，影响经济效益。事实上，即使由于工程实际需要必须采取“长隧短打”的施工方案，也有一个在多大规模上组织多头掘进的问题。决定多头掘进规模的一个重要因素就是长距离通风技术能否为长距离独头掘进和机械化快速施工创造条件。在保证合同工期的前提下，根据机械设备配套的快速施工能力来尽可能延长独头掘进长度，以便少开设工作面，从而减少设备、人力和资金的投入，简化管理层次和组织机构，在工艺、技术和管理上采取综合配套措施，组织快速施工，去争取最大的经济利益和社会效益。从隧道建设的发展趋势看，实现工程

全局的高速度和高效益必须依靠高度机械化的长距离独头掘进来实现，研究高性能施工设备及其配套技术和施工管理技术自然成为至关重要的课题。与此同时，研究和应用长距离通风技术也是其中的重要方面。通风系统本来就是机械化快速施工工程系统的一部分。

在我国铁路隧道施工方面，当前比较突出的技术问题是通风技术仍然不能满足工程建设的要求，许多工地的通风状况没有获得令人满意的效果，特别是在以内燃设备为动力的机械化施工中，通风已成为普遍存在的技术难题。出现这种现象的原因是多方面的，各地的情况也不尽相同，总的说来，主要有两方面的原因，一是长距离通风技术的发展水平和国产设备的技术性能与施工的实际要求不适应；二是许多工程指挥人员和技术人员对隧道通风知识缺乏必要的了解，或者对通风技术的应用和重视程度不够，一些本来可以解决的问题没有尽力去解决，或不知道怎样处理。针对这种情况，有关部门提议写一本面向施工第一线技术人员、管理干部和工人的通俗、实用的读本，既可以指导施工通风系统的设计，也可以指导现场实际操作。本着这一宗旨，本书先介绍隧道施工通风与防尘的基本知识，通风设备的一般工作原理和结构，通风设计一般计算方法和通风系统安装、维护、管理的基本知识。针对当前长隧道施工通风技术难题，再介绍有关解决这一问题的最新研究成果与进展，以及应用试验的效果，以便使大家相信，在大多数施工条件下，只要从技术、设备、管理等方面同时下功夫，问题是可以解决的，至少可以达到人们能够基本接受的程度。

当然，以上只是作者的良好愿望。实际上，由于知识与技术水平的限制，本书在内容结构、叙述方面难免存在众多

目 录

第一章 隧道施工气候条件	1
第一节 施工隧道中的大气成分	1
第二节 隧道施工气候条件	10
第三节 隧道施工通风的任务	15
第二章 隧道空气流动的基本规律	16
第一节 空气的物理性质	16
第二节 隧道空气压力及测定	20
第三节 风流的流动状态	30
第四节 隧洞风流的流速及测定	32
第五节 隧道空气流动的基本方程式	40
第六节 通风动力与阻力之间的关系	45
第七节 通风阻力	50
第三章 隧道施工通风动力与设备	60
第一节 自然通风	60
第二节 通风机的构造与分类	63
第三节 通风机的性能	67
第四节 通风机的工况点及通风机联合运转	76
第五节 引射器	86
第六节 通风管道	91
第四章 隧道施工通风技术	102
第一节 隧道施工通风方法	102
第二节 施工通风的风量计算	103

第三节	隧道施工通风设备选择	124
第四节	铁路长隧道施工通风的综合治理	128
第五节	长距离软管通风技术的研究及应用	140
第六节	高原隧道施工通风	155
第七节	隧道施工通风技术测定	161
第五章	铁路隧道施工防尘技术	167
第一节	粉尘的来源及危害	167
第二节	通风除尘	168
第三节	湿式作业	171
第四节	个人防护	174
第五节	粉尘浓度的测定	174
附录一	各类巷道摩擦阻力系数表	178
附录二	光滑管道局部阻力系数	178
附录三	几种国产风机的性能特征	181
附录四	铁风筒漏风系数表	184

第一章 隧道施工气候条件

第一节 施工隧道中的大气成分

一、地面空气的成分

地面空气是混合气体，其组成如表 1—1 所示。

清洁空气成分表

表 1—1

气 体 名 称	浓 度 %	
	体积浓度%	质量浓度%
氮	78.13	75.55
氧	20.90	23.10
二氧化碳	0.03	0.05
氩、氖等	0.94	1.30

洞外地面大气中还含有各类细微颗粒，如尘埃、水蒸汽、微生物等。这些物质不计入空气的组分，也不影响主要成分之间的比例关系。

1. 氧 (O_2)

氧是无色、无味、无臭的气体，相对密度（与空气密度之比）为 1.11。

氧化过程是人类生命活动的基本过程之一，人体必须不断地吸入氧气，呼出二氧化碳，以保证生命活动继续进行。人体需要的氧量，取决于人的体质、精神状态和劳动强度，如表 1—2 所示。

不同劳动强度的耗氧量

表 1—2

工作状态	呼吸空气量(L/min) (氧浓度21%)	氧消耗量 (L/min)
休息	6~15	0.2~0.4
轻工作	20~25	0.6~1.0
中度劳动	30~40	1.2~1.6
重体力劳动	40~60	1.8~2.4
极重体力劳动	40~80	2.5~3.0

人体吸入的氧量与空气中含氧浓度（或氧分压）密切相关。若空气中氧浓度降低（或氧分压减小），人体就处于缺氧状态，出现各种不适症状，严重缺氧将导致死亡。人体缺氧症状与空气中氧浓度的关系如表 1—3 所示。

急性缺氧症状与氧浓度的关系

表 1—3

氧体积浓度%	主要症状
17	静止状态时无影响，工作时喘息，呼吸困难，心跳快
15	人体缺氧，呼吸及心跳急促，耳鸣目眩，感觉及判断能力减弱，肌肉功能破坏失去劳动能力
10~12	失去理智，时间稍长即有生命危险
6~9	失去知觉，呼吸停止，心脏在几分钟内尚能跳动，如不及时急救，会导致死亡

由于缺氧而虚脱的人，一般还可以复苏，但若缺氧情况严重或虚脱时间过长，则可能在复苏后出现永久性伤害，其中以脑伤害为主。

2. 二氧化碳 (CO₂)

二氧化碳无色、无臭，略带酸味。相对密度1.52，易溶于水，生成碳酸，对眼、鼻、喉粘膜有刺激作用。

二氧化碳不助燃也不能供人呼吸，但空气中含有的微量

二氧化碳有刺激呼吸中枢神经的作用，如果完全没有它，人体的正常呼吸功能就不能保持，所以在人工输氧时，往往加入5%的二氧化碳，以刺激呼吸功能。

二氧化碳对人体的毒害取决于空气中二氧化碳的浓度。一般地说，在工作环境中（每天八小时工作）的最大允许浓度为0.5%。人体二氧化碳中毒症状与浓度的关系如表1—4所示。

二氧化碳中毒症状与浓度的关系 表1—4

CO ₂ 体积浓度%	主 要 症 状
1	呼吸加深，对工作效率无明显影响
3	呼吸急促，心跳加快，头痛，人体很快疲劳
5	呼吸困难，头痛、恶心、呕吐、耳鸣
6	严重喘息，极度虚弱无力
7~9	动作不协调，大约十分钟内发生昏迷
10~11	五分钟发生窒息，有人在三分钟后致死

3. 氮 (N₂)

氮无色、无臭、无味，相对密度为0.97。氮对人体无害，但空气中氮的浓度增加，必然导致氧的浓度下降，从而对人体产生间接损害。

我国矿山安全规程及铁道部颁布的《隧道施工技术规范》规定，凡有人工作的地点，氧的体积浓度不得低于20%，二氧化碳浓度不得超过0.5%。

二、施工隧道空气中常见的有害成分

正在施工的隧道空气中常见的有害成分包括 一氧化碳

(CO)、二氧化氮(NO_2)、二氧化硫(SO_2)、柴油机废气以及粉尘等。这些有害成分的来源主要是：爆破时所产生的炮烟、柴油机工作时所产生的废气，装碴、运输、喷锚作业中产生的粉尘和各种火灾事故和灾害产生的毒害物质等。

炸药在坑内爆炸后，产生大量有毒有害气体，其种类和数量与炸药的性质、爆炸条件及介质有关。在一般情况下，产生的有毒有害气体大部分为一氧化碳和氮氧化合物。如果将爆破后产生的二氧化氮，按1L二氧化氮折合为6.5L一氧化碳计算，则1kg炸药爆破后产生的有毒气体相当于80~120L一氧化碳量。

柴油机工作时排出的废气成分很复杂，它是柴油在高温高压下进行燃烧时所产生的各种有毒有害气体的混合物。一般情况下含有氮氧化合物、含氧碳氢化合物、低碳氧化合物、油烟等。但其中的主要成分为氧化氮、一氧化碳、醛类和油烟等。柴油机排放的废气量由于受各种因素的影响，变化较大，没有统一标准，1975年一机部、冶金部召开的废气净化座谈会上，提出了国产坑内矿用柴油机废气排放指标，可作为参考，现列于表1—5中。

坑内矿用柴油机废气排放指标 表1—5

成 分	135系列柴油机	105系列柴油机
CO	10.20g/kWh	10.20g/kWh
NO_x	6.80g/kWh	8.16g/kWh
CH	1.36g/kWh	1.36g/kWh

三、各种有毒气体的性质

1. 一氧化碳(CO)

一氧化碳是无色、无臭、无味的气体，对空气的比重为0.97，故能均匀地散布于空气中，不用特殊仪器不易察觉。一氧化碳微溶于水，一般化学性不活泼，但浓度在13%~75%时能引起爆炸。

一氧化碳极毒，当空气中CO浓度为0.4%时，在很短的时间内人就会失去知觉，抢救不及时就会中毒死亡。

日常生活中的“煤气中毒”就是一氧化碳中毒。人体血液中的血红素是专门在肺部吸收空气中的氧气以维持人体的需要。而血红素的另一种特性是它与一氧化碳的亲合力超过它与氧的亲合力的250~300倍。由此，当人体吸入含一氧化碳的空气后，一氧化碳很快与血红素结合，这就大大降低了血红素吸收氧的能力，使人体各部分组织和细胞产生缺氧现象，引起窒息和血液中毒，严重时造成死亡。

一氧化碳的中毒程度和中毒的快慢与下列因素有关：

1) 空气中一氧化碳的浓度。人处于静止状态时，CO浓度与人中毒程度关系如表1—6。

一氧化碳的浓度与人体中毒程度的关系 表1—6

中毒程度	中毒时间	CO 浓度		中毒特征
		mg/l	体积比%	
无征兆或有 轻微征兆	数小时	0.2	0.016	
轻微中毒 严重中毒	1h以内	0.6	0.048	耳鸣、心跳、头昏、头痛 耳鸣、头痛、心跳、 四肢无力、哭闹、呕吐
	0.5~1h	1.6	0.128	
致命中毒	短时间内	5.0	0.40	丧失知觉，呼吸停顿

2) 与含CO的空气接触时间。接触时间愈长，血液内CO量愈高，中毒就愈严重。

3) 呼吸频率和呼吸深度。人在繁重工作或精神紧张

时，呼吸急促，频率高，呼吸深度加大，中毒就快。

4) 与人的体质和体格有关。人们经常处于CO略微超过允许浓度的条件下工作时，虽短时间不会发生急性病状，但由于血液及组织长期轻度缺氧，以及对神经中枢的伤害，会引起头痛，胃口不佳，记忆力衰退及失眠等慢性中毒等病症。

我国矿山安全规程和《铁路隧道施工技术规范》规定：空气中CO浓度不得超过0.0024%（按体积计算，即24ppm），按重量计算不得超过0.03mg/L。爆破后，通风机连续运转条件下，CO的浓度降至0.02%时，就可进入工作面。

2. 氮氧化物 (NO₂)

炸药爆炸和柴油燃烧产生大量的一氧化氮和二氧化氮，一氧化氮极不稳定，遇空气中的氧即转化为二氧化氮。

二氧化氮是一种褐红色的有强烈窒息性的气体，对空气的比重为1.57，易溶于水，而生成腐蚀性很强的硝酸。所以它对人的眼、鼻、呼吸道及肺部组织有强烈腐蚀破坏作用，对人体破坏作用最大的是破坏肺部组织，引起肺水肿。

二氧化氮中毒后有较长的潜伏期，初期没有什么感觉（经过4~12h甚至24h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，以致很快死亡。

当空气中二氧化氮浓度为0.004%时，2~4h还不会引起中毒现象。当浓度为0.006%时，就会引起咳嗽，胸部发痛。当浓度为0.01%时，短时间内呼吸器官就有很强烈的刺激作用，咳嗽、呕吐，神经麻木。当浓度为0.025%时，很快使人中毒死亡。

我国矿山安全规程及《铁路隧道施工技术规范》规定：

氮氧化物不得超过0.00025%，质量浓度不超过5mg/m³。

3. 硫化气体 (H₂S, SO₂)

硫化气体是在开挖经过硫化矿床的隧道时，硫化矿物缓慢氧化和水解后产生的，某些有机物的腐败和高硫柴油的燃烧也产生硫化气体，但铁路隧道施工中硫化气体含量过高的情况并不常见。

硫化气体对人的眼部和呼吸系统有强烈毒害作用，在某些特殊地质环境的隧道施工中不应忽视。

我国矿山及铁路部门规定，隧道空气中硫化氢含量不得超过0.00066%，SO₂含量不得超过0.0005%。

四、有毒气体中毒时的急救

工作人员遇有毒气体中毒或缺氧时，应立即组织抢救，以便及早脱离危险，保障生命安全。

中毒时的急救措施如下：

1. 立即将中毒者移至新鲜空气处（如风管出口处）或洞外；
2. 将患者口中一切妨碍呼吸的东西如假牙、粘液、泥土除去，松开领扣及腰带；
3. 使患者保暖；
4. 为促使患者体内毒物洗净和排除，给患者输氧。当CO、H₂S中毒时，最好在纯氧中加入5%的CO₂，以刺激呼吸中枢神经，增强呼吸能力。当NO₂或SO₂中毒时，进行人工呼吸应特别小心，因为患者中毒后会起肺水肿，所以施行人工呼吸应尽量避免对患者肺部的刺激，以免加剧患者肺部浮肿。特别在NO₂中毒时，只能用拉舌头的人工呼吸法刺激神经引起呼吸，并在喉部注入碱性溶液（NaHCO₃小

苏打水) 以减轻肺水肿症状。

五、有毒气体的测定

有毒气体测定方法很多, 因有毒气体对人危害很大, 应以快速准确的测定法为宜, 所用测试仪器要便于携带, 施工现场广泛采用检定管快速测定法和各种传感器电测方法。

检定管快速测定法所使用的仪器有: 检定管、抽气唧筒、秒表。

检定管检定各种有毒气体的原理, 是根据待测气体与检定管中的指示剂发生化学反应后变色的长度和深浅来确定。以变色深浅来确定有毒气体浓度者为比色法, 以变色长度确定浓度者为比长法。指示剂是按所测有毒气体的性质来配制。目前我国生产的检定管有测定一氧化碳、硫化氢、氧化氮等数种(图 1—2)。

抽气唧筒(图 1—1)用以采集试样, 容积为 50mL。活塞杆上有刻度, 有一三通开关, 当开关把手在水平位置时, 入口与唧筒相通, 当把手在垂直位置时, 唧筒与出口相通。

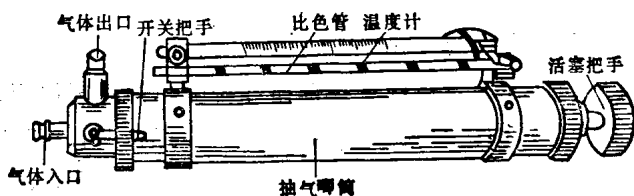


图 1—1 抽气唧筒

测定步骤: ①将检定管玻璃封口切开, 插在抽气唧筒口上, ②将三通开关转到垂直位置, 用 100s 时间缓慢压送唧

筒内待测气体，使之均匀通过检定管，与管中指示剂起化学反应，指示剂变色，颜色变化的深浅与标准比色板相比较，即可确定有毒气体的浓度。若用比长检定管，根据变色长度即可确定待测气体的浓度。



图 1—2 比长式一氧化碳检定管

- 1 —— 堵塞物； 2 —— 活性炭； 3 —— 硅胶； 4 —— 消除剂；
5 —— 玻璃粉； 6 —— 指示剂。

目前，铁路隧道施工中广泛使用柴油机动力设备，测定CO、NO就更为重要。一般使用的仪表有：红外线CO分析仪、红外线NO分析仪，以及各种数字测量仪表。

六、岩 尘

在掘进施工过程中所产生的一切细散状矿物和岩石的尘粒，称为岩尘或粉尘。

能悬浮于空气中的岩尘称为浮尘，沉落于隧道壁的矿尘称为落尘。

矿、岩尘是一种有害物质，它危害人体的健康，当落于人的潮湿的皮肤上，有刺激作用，会引起皮肤发炎，特别是硫化矿尘。它进入五官亦会引起炎症。有毒矿尘（铅、砷、汞）进入人体还会引起中毒。矿尘最大危害是，当人体长期吸入含有游离二氧化硅（ SiO_2 ）的矿尘时，会引起矽肺病。矿尘中游离二氧化硅含量越高，对人体危害越大。一般金属矿山游离二氧化硅含量在30~70%左右，也有高达90%以上的。

根据国务院颁布的《关于防止厂矿企业中矽尘危害的决

定》中规定，作业场所空气中粉尘浓度允许：含游离二氧化硅大于10%者，不得超过 2 mg/m^3 ；小于10%者，不得超过 10 mg/m^3 。

第二节 隧道施工气候条件

一、概 述

工人在生产劳动中，体内不断地进行着新陈代谢作用而产生大量的热。所产生的热除少部分消耗于人体内部外，其余大部分通过辐射、对流和蒸发等方式向空气散发，当人体产生和散发的热量保持平衡，即体温保持在 $36.5\sim 37^\circ\text{C}$ 时，人体就感觉舒适。为保持人体的热平衡，需要从人体的生热和散热两方面来考虑。影响人体生热主要因素是劳动强度，影响人体散热的主要因素是空气的温度、湿度、风速三者的综合状况。

二、隧洞空气温度

洞内空气温度是影响劳动气候条件的重要因素，气温过高或过低都会导致气候条件恶化。坑内最适宜人们劳动的温度是 $15\sim 20^\circ\text{C}$ ，掘进工作面的温度不宜超过 26°C 。在铁路隧道掘进中，影响洞内空气温度的主要因素是洞外地面空气温度和洞内岩层温度，各种动力设备的工作对局部温度有明显的影晌。

三、隧洞空气湿度

一般地说，空气相对湿度低于30%，水分蒸发过快，会引起人体粘膜干裂；相对湿度大于80%，水分蒸发困难，使

人烦闷。比较舒适的湿度为50~60%左右。

空气湿度有两种表示法：

绝对湿度——指单位体积空气中所含水蒸汽的质量
(kg/m^3)；

相对湿度——空气中所含水蒸汽的质量与同温度下的饱和湿度之比。

相对湿度按下式计算：

$$\varphi = \frac{f}{F}$$

式中 φ ——相对湿度；

f ——绝对湿度， kg/m^3 ；

F ——饱和湿度，即在温度不变的条件下，每 1m^3 空气所能容纳的最大限度的水蒸汽量的克数。饱和湿度的大小，与温度有关，温度越高，饱和湿度的值越大，在一定温度下，饱和湿度为常数。

空气的相对湿度可以用手摇湿度计（图1—3）或风扇湿度计（图1—4）测量。两种湿度计都是由两支相同的温度计组成。使用时，在一支温度计的水银球上包着用水湿润的纱布，称为湿温度计。为区别起见，另一支称为干温度计。湿温度计由于外包湿纱布的水分被周围空气蒸发，吸收热量而温度下降，待湿温度计示数稳定后，即可根据干、湿温度计的读数差值和干温度（或湿温度）的读数在表1—7中查得相对湿度。

例：干温度计读数 $t_{\text{干}}=22^{\circ}\text{C}$ ，湿温度计读数 $t_{\text{湿}}=20^{\circ}\text{C}$ ，在表1—7中可查得相对湿度为 $\varphi=82\%$ 。