



# 隧道通风及隧道空气动力学

华东交通大学

金学易 陈文英 编著

中国铁道出版社

1983年·北京

本书共分六章。绪论、第一、五、六章由金学易编写，第二、三、四章由陈文英编写。书稿承北方交通大学张弥副教授审阅，提出了许多宝贵意见。在编写过程中，曾得到兄弟单位的支持帮助，并提供了一部分技术资料，在此一并表示衷心感谢。

编 者

1 9 8 1 年12月

## 隧道通风及隧道空气动力学

华东交通大学

金学易 陈文英 编著

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{32}$  印张：7.125 字数：158千  
1983年11月 第1版 1983年11月 第1次印刷  
印数：0001—4,000 册 定价：0.80 元

## 内 容 简 介

本书系统地阐述隧道通风及隧道空气动力学的基本原理，内容共分六章。第一、二章介绍与隧道有关的空气动力学、热力学及气象学的基本知识；第三、四、五章阐述铁路隧道通风的设计计算原理及通风机性能；第六章介绍高速列车通过隧道时的瞬变压力和列车空气阻力的计算方法，以及隧道总体形式与空气动力学效应的关系。

本书可作为高等学校隧道专业教学参考书，也可供该专业研究生、教师和工程技术人员参考。

## 前 言

铁路长隧道机械通风工程在世界上已经有一百多年的历史。我国从五十年代开始在丰沙线一些铁路隧道中装设机械通风系统以来，也已经走过了将近三十年的历程。但迄今为止国内外系统地阐述铁路隧道通风工程设计理论的专门参考书尚为数甚少。随着我国铁路工程技术的发展，长隧道的数量和长度将继续增加，行车密度将继续增大，内燃机车和蒸汽机车也还要长期使用，因而隧道通风系统在隧道中的地位与作用将日趋重要。近十几年来，世界各国相继发展高速列车，研究高速列车通过隧道时所引起的空气动力学问题已成为突出的课题。鉴于上述两方面原因，并考虑到目前高等院校的隧道教材中对隧道运营通风讲述不多，在内容上有待加深加广，以满足扩大学生知识面的需要，因此，经教材编审会的建议，我们将原在西南交大讲授“隧道通风及隧道空气动力学”课程的讲义加以整理后出版，以供工程技术人员和大专院校师生参考。

本书侧重于隧道通风与隧道空气动力学的计算原理。为了提供一个较完整的理论基础，以适当的篇幅介绍了有关的空气动力学、热力学和气象学的基本知识。

鉴于目前国际通风会议上的学术论文一律采用国际单位制，我国公布的计量单位名称与符号方案也是以国际单位制为基础的，所以本书采用国际单位制。但考虑到我国铁路工程界过去一直使用工程单位制，因此在书中很多地方用两种单位制并列说明，在书后附录中列出两种单位制的换算关系。

# 目 录

绪 论	1
一、铁路隧道通风工程的历史、现状与展望	1
二、空气的成分及污染物	5
三、空气的状态方程与状态参数	9
<b>第一章 空气动力学基本方程</b>	<b>16</b>
第一节 静止大气中气压沿海拔高度的变化 规律	16
第二节 气体流动的连续性方程	19
第三节 气体运动的微分方程及伯诺里方程	22
第四节 热力学的基本概念与定律	27
第五节 音速—压力波的传播速度	31
第六节 可压缩气体的能量方程	34
第七节 流体运动的动量方程	40
第八节 管道气流的压头损失	42
<b>第二章 隧道外自然风的气象学原理</b>	<b>50</b>
第一节 风的成因—大气运动所受的力	50
第二节 自由大气及摩擦层中的风	53
第三节 大气环流、季风、与地方性风系	57
第四节 我国各地的风向风速分布	62
<b>第三章 铁路隧道自然通风可能性的分析计算</b>	<b>66</b>
第一节 隧道内的自然风及其等效压差	66
第二节 单线无竖井隧道的列车活塞风	71
第三节 单线有竖井隧道的列车活塞风	83
第四节 铁路隧道的自然通风	94

<b>第四章 铁路隧道的机械通风</b> .....	102
第一节 隧道通风的方式 .....	103
第二节 风道的设计 .....	108
第三节 洞口帘幕式通风 .....	113
第四节 无帘幕吹入式通风 .....	119
第五节 竖井（或斜井）吸出式通风 .....	130
第六节 多竖井分段式通风 .....	144
第七节 人字坡隧道及双线隧道的通风计算 特点 .....	148
<b>第五章 通风机的构造、性能与选用</b> .....	151
第一节 通风机的构造及工作原理 .....	151
第二节 通风机的性能 .....	156
第三节 通风机的选用 .....	171
<b>第六章 高速列车通过隧道的空气动力学问题</b> .....	183
第一节 高速列车通过隧道时的瞬变压力 .....	183
第二节 列车在隧道中运行的空气阻力 .....	198
第三节 特长隧道总体形式与空气动力学效应 的关系 .....	211
附录 1 国际单位制与工程单位制换算关系表 .....	215
附录 2 自然风速等级表 .....	216
<b>参考文献</b> .....	216



## 绪 论

### 一、铁路隧道通风工程的历史、现状与展望

内燃机车或蒸汽机车通过隧道时要排放出大量有害气体和烟尘。为保证隧道内作业工人的正常劳动卫生条件和列车上旅客的安全与舒适，对铁路长隧道，一般要装置机械通风设备，将隧道内污浊空气排出洞外，使通风后的隧道内有害气体浓度降低到卫生标准的允许值以下。其相应的工程设施，称为隧道通风工程。图 0—1 所示为最简单的铁路隧道通风工程设施。

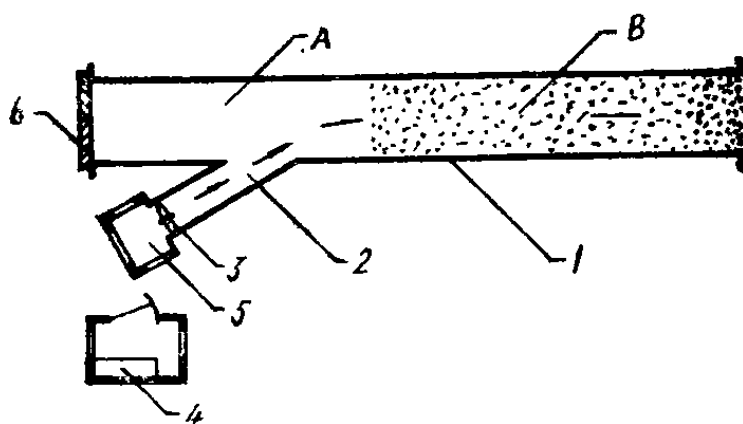


图 0—1 铁路隧道通风工程设施

1 —— 隧道； 2 —— 风道； 3 —— 风机； 4 —— 配电设备及控制设备； 5 —— 风机房； 6 —— 洞口帘幕； A —— 新鲜空气段； B —— 污浊空气段； 箭头表示气流方向。

早期修建铁路长隧道时，曾考虑过不采用机械通风而单纯靠自然通风。例如，英国1841年建成的博克斯(BoX)隧道(长2935米)用扩大隧道横断面积的办法，在隧道的上方余留下很大的空间，以暂时集存机车排出的烟气，以免烟气侵

入旅客车厢。但事实证明，这一办法收效很小而隧道造价却增加很多，所以不能作为有效的通风方式。以后也考虑过利用长隧道施工时留下的竖井或斜井作为隧道自然通风之用。例如，1838年建成的英国基斯倍（Kiesby）隧道（长2218米）采用两座直径为18米的竖井用作自然通风；1848年建成的英国莫利（Morley）隧道（长2166米）设置四座椭圆形竖井用作自然通风，椭圆的长轴为12米，短轴为9米。不过，竖井自然通风取决于洞内外温度差，并受洞外自然风的风速、风向、隧道口位置、竖井出口位置等因素的影响，因而其通风效果不够稳定，带有很大的季节性和区域性。而行车密度大的长隧道，要求在较短时间内排清隧道内烟气，在这种情况下，竖井自然通风就往往不能满足要求。

既然扩大隧道断面对通风没有显著效果，利用竖井使隧道自然通风又不十分可靠，于是有效的办法就是机械通风，即利用通风机将新鲜空气吹入隧道内，或将洞内污浊空气吸出隧道外。这样，在十九世纪六十年代以后修建的长隧道，例如1871年建成的穿越阿尔卑斯山的仙尼斯峰（Mont Cenis）隧道（长12840米），1882年建成的圣哥德（Saint Gothard）隧道（长14998米）以及以后所修建的其他长隧道，都安装了通风设备。从那个时候算起到现在，长隧道采用机械通风已有一个世纪的历程了〔1〕。

一个世纪以来，铁路牵引动力有很大发展，由蒸汽牵引发展到内燃牵引和电力牵引。但是隧道越修越长，通风系统仍然是长隧道不可缺少的组成部分。有人以为采用电力牵引之后，隧道不再需要机械通风。其实不然，因为电力机车在隧道中运行时，由于机车受电弓与接触网滑动接触有时会脱离而放电，从而在隧道内也产生一定量的氮氧化合物有害气体，对行车密度大的长大隧道，在通过相当次数的列车后仍

必需进行一次机械通风。此外，对埋深较大的长隧道，由于地热以及机车在隧道中消耗的功率转变为热量而散发在隧道中，当列车密度很大时可使隧道内的气温很高。为保持隧道内正常的劳动卫生条件，要求夏季温度低于 $30^{\circ}\text{C}$ 冬季低于 $25^{\circ}\text{C}$ 〔4〕，对这种隧道也需要进行机械通风以降低隧道内温度，而且通风还可降低湿度。于是，通风的目的由对蒸汽机车和内燃机车通过的隧道以排除有害气体和烟尘为主转变为对电力机车通过的长隧道以降温除湿为主。此外，在电力机车运行的双线长隧道中，当双向都有列车运行时，列车的活塞作用不能向隧道内引入新鲜空气，也需用通风机向隧道内送入新鲜空气以满足旅客的生理需要。所以，即将建成的穿越日本津轻海峡的青函隧道（长53800米）和计划修建的穿越英国和法国之间多佛尔海峡隧道（长49600米）以及穿越阿尔卑斯山的圣哥达低线隧道（长48670米），这些电力机车运行的长隧道都有机械通风系统〔2〕〔3〕〔4〕。

我国是铁路隧道较多的国家之一，到1979年底我国已修建铁路隧道4386座，总延长2009.7公里〔5〕，其中已设计了运营通风系统的长隧道有136座，总延长约为386公里（占我国隧道总延长的19.2%）〔6〕。随着我国隧道工程技术的发展，需要机械通风的长隧道的数量和长度都在增加。五十年代建成的长隧道需要机械通风的只有39座，其中最长的川黔线凉风垭隧道，长4270米。六十年代需要机械通风的隧道增到80座，其中最长的成昆线沙木拉达隧道，长达6379米。七十年代需要机械通风的长隧道进一步增加到136座。目前我国已通车的设置通风系统的最长隧道是京原线驿马岭隧道（长7032米），八十年代正在修建的京广复线大瑶山隧道，长14300米。今后一方面随着行车速度的提高，线路要求更加顺直平缓，长隧道的数量还会增加，另一方面，蒸汽机车

还要长期使用，长 1.5 公里左右的蒸汽机车运行的隧道也需要机械通风，因而隧道通风系统仍然是我国长隧道不可缺少的配套工程。但我国铁路隧道通风的现状还不能令人满意，有些问题还需要研究解决。

六十年代以后，日本、英、法等国都先后修建高速铁路，出现一系列空气动力学问题。当高速列车进入隧道时，隧道内的空气突然受到压缩而形成压力波。压力波以音速传递到隧道出口后又以膨胀波方式反射回来，此后压力波与膨胀波在隧道中连续地传播与反射，使列车上的旅客和隧道中的作业工人经受剧烈变化的空气压力波动（或称压力瞬变）而感到很不舒适，甚至可破坏耳膜。严重的瞬变压力还能毁坏列车前窗玻璃，并干扰隧道通风系统的工作。高速列车在隧道中运行的空气阻力比明线上大得多，如要在隧道中保持原来的行车速度则需增大列车发动机的功率，从而使隧道内温度急剧升高。不然，在既成的隧道中就需限制行车速度，而这样做又会影响通过能力。于是对新设计的高速行车隧道，就需要由空气动力学角度来确定隧道的横断面大小和总体形式〔7〕。空气质量、温度、压力瞬变已成为现代铁路隧道环境控制的三个方面问题，而隧道通风是改善隧道环境污染的主要办法之一。鉴于高速铁路隧道设计中，空气动力学问题已成为一个突出的问题，从1973年起由英国流体力学研究协会流体工程学会发起和组织国际空气动力学和交通隧道通风讨论会 (ISAVVT) 每隔三年举行一次会议。它反映了近年来世界各国大力开展隧道中空气流动问题的研究情况，也说明空气动力学理论已日益广泛地应用在隧道工程的技术领域中。

隧道是铁路的重要结构物，隧道通风系统是长隧道不可缺少的组成部分。而且隧道通风和空气动力学问题往往在铁

路选线设计时就需加以考虑，例如在确定隧道两端的车站位置时应计算隧道的通风时间，在确定隧道内线路的坡度时必需计算列车在隧道内运行时所受的空气阻力。至于在隧道本身设计时，从隧道总体形式的选择是采用单孔双线隧道还是采用双孔单线隧道，隧道横断面积的确定，以至隧道施工方法是否采用竖井、横通道等问题，都需与隧道通风及空气动力学问题结合在一起考虑才能做出最经济合理的抉择。这就是铁路工程技术人员为什么需要具备一定的通风和空气动力学知识的原因。本书正是为此目的而编写的。

## 二、空气的成分及污染物

### (一) 洁净空气的成分

使人们健康地生活的洁净空气是由多种气体混合组成。它的主要成分是氧、氮、二氧化碳、氩及其他惰性气体和含量微小但不固定的水汽，此外还有一些悬浮着的固体微粒（尘土）和液体微粒。大气的各成分所占的百分比如表 0—1 所示。

大气的成分（25公里高度以下）

表0—1

气 体	按体积百分比	按质量百分比
氮(N <sub>2</sub> )	78.09	75.52
氧(O <sub>2</sub> )	20.95	23.15
氩(Ar)	0.93	1.28
二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	0.03	0.05
氖(Ne)	0.0018	
氦(He)	0.005	
水汽(H <sub>2</sub> O)	微量（不固定）	

为维持人的正常生命活动，大气中氧的含量不得少于 20.5%（按体积计），但也不宜过多。而氮气正好冲淡大气

中氧的含量，使氧化作用不致过于激烈。二氧化碳是碳或有机化合物氧化作用的产物，它在大气中的含量虽然微小，但对人类生活却有较大影响。大气中二氧化碳含量约占0.03%，随时间、地点而略有不同，在大工业城市中二氧化碳的含量可达0.05%~0.07%，当其含量超过0.6%时，对人类生活有害。大气中的水汽主要来自地表水面的蒸发，其含量随环境及气候而有显著差异。

如果工业、交通运输业的生产废气不经处理而排入大气中，使大气中增加很多对人类健康有害的气体成分，则称为大气污染。大气污染的后果是引起人们的呼吸道疾病与生理机能障碍，严重者可发生中毒死亡。内燃机车或蒸汽机车通过隧道所排出的废气中含有各种有害气体，严重污染隧道内的空气，其污染情况分述如下。

### (二) 机车废气对隧道内空气的污染及其毒性

内燃机车通过隧道时，由机车柴油机所排放出的废气中含有的有害气体主要有一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)及其他氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、甲醛(HCHO)、乙醛(CH<sub>3</sub>CHO)以及未燃烧完全的燃料微粒所形成的烟尘等。这些有害物质的浓度取决于内燃机车发动机的性能、工况和燃油的成分，随着机车的类型、牵引吨位、运行速度的不同而有很大的差别。

空气中污染物的浓度一般用每立方米被污染的大气中含有多少毫克污染物(mg/m<sup>3</sup>)表示。有时也用百万分体积浓度(ppm)计量。1ppm是指在常温常压下，1立方米被污染的空气中含有10<sup>-6</sup>立方米有害气体，即按体积计的浓度为百万分之一。1克分子(摩尔)气体在常温常压(25°C, 760毫米水银柱)下占有24.45升的体积，因此ppm和mg/m<sup>3</sup>之间的单位换算关系为〔8〕

$$1\text{ppm} = \left( \frac{M}{24.45} \right) \text{mg}/\text{m}^3$$

式中  $M$ ——该气体的分子量。

表 0—2 示成昆线沙木拉达隧道中内燃机车废气对空气污染浓度的一些测定值〔9〕。

内燃机车废气对隧道中空气的污染浓度 表0—2

有害气体	污染浓度 (毫克/米 <sup>3</sup> )	附注
CO	14.2	在隧道接近中心段, 连续测定六次列车通过后的空气中污染物浓度。
CO <sub>2</sub>	5075	
NO	111.4	
NO <sub>2</sub>	70.3	
NO <sub>x</sub>	162.4	
SO <sub>2</sub>	1.49	
HCHO	0.57	

蒸汽机车所排出的煤烟中, 主要的有害气体是一氧化碳、二氧化碳和二氧化硫。这些有害气体的浓度与机车的性能及所用的煤质有关。在沈丹线福金岭隧道曾测到一氧化碳浓度最高达 3890 毫克/米<sup>3</sup>〔6〕, 在长林线枫叶岭隧道曾测得一氧化碳浓度为 1380 毫克/米<sup>3</sup>〔10〕, 在京承线夹马石隧道测得二氧化硫浓度为 67 毫克/米<sup>3</sup>〔10〕。

现将上述各种有害气体的毒性〔11〕〔12〕叙述如下:

(1) 一氧化碳 对人体血液中血红蛋白有强烈的亲和力, 约为氧的 300 倍。一氧化碳与血液中的血红蛋白结合成碳氧血红蛋白 (HbCO) 之后, 使血红蛋白失去荷氧能力, 不能将氧输送给肌体各组织, 导致各组织缺氧。一氧化碳对人体健康的影响视其浓度、接触时间、和人的呼吸强度而定, 如图 0—2 所示。由图中可见, 当工人在劳动中与浓度

为 100ppm 的一氧化碳接触 1 小时后即会出现轻度头痛及其他症状。

(2) 氮氧化合物 人们吸入氮氧化合物 (主要是二氧化氮) 后, 在呼吸系统的深处溶解成亚硝酸和硝酸, 有刺激性, 可造成喉咙和支气管充血, 并且与细胞组织中的碱类中和形成硝酸盐和亚硝酸盐, 又能致使动脉扩张、血压下降、头痛和头晕。一氧化氮对血液中的血红蛋白也具有显著亲合力, 其所形成正铁血蛋白化合物使人体缺氧。二氧化氮对人体组织的损害有时是永久性的, 它的毒性是一氧化氮的五倍。

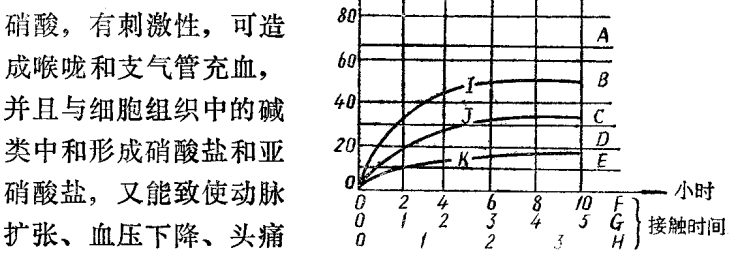


图 0-2 一氧化碳对人体的影响  
 A—死亡; B—危险; C—有严重症状; D—中等症状; E—轻度症状; F—休息状态; G—走行状态; H—劳动状态; I—CO = 500 ppm; J—CO = 250 ppm; K—CO = 100 ppm。

人体组织的损害有时是永久性的, 它的毒性是一氧化氮的五倍。

(3) 二氧化硫 其主要毒害作用是吸入人体溶解后形成亚硫酸, 对上呼吸道及支气管和眼睛有强烈的刺激性。隧道空气中的二氧化硫对隧道内的结构物和设备也有腐蚀作用。

(4) 醛类 包括甲醛和乙醛, 对眼睛和呼吸系统都有刺激作用, 并且有不良气味。

(5) 烟尘 含有未燃烧完全的碳氢化合物。

(三) 劳动卫生标准

为保证工人的健康, 国内外对人们所接触的有害气体最高允许浓度都有明确的规定, 称为劳动卫生标准, 见表 0-3。



有害气体的最高允许浓度

表0—3

有害气体	我国工业企业标准 (注) (GBJ1-62) (毫克/米 <sup>3</sup> )	美国规定的阈限值(TLV)	
		(ppm)	(毫克/米 <sup>3</sup> )
CO	30	50	57.3
CO <sub>2</sub>		5000	9000
NO		25	30.7
NO <sub>2</sub>	(折算成N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) 5	5	9.4
SO <sub>2</sub>	20	5	13.1
HCHO	5	5	6.1

(注) 工人在隧道内的劳动条件与在工业企业内劳动条件不完全一致, 因此二者的卫生标准不一定相同。关于铁路隧道的卫生标准正在研究制订中。

我国铁路工程技术规范规定: 列车通过隧道后15分钟以内, 隧道中空气的一氧化碳浓度应在30毫克/米<sup>3</sup>以下, 氮氧化物(折算成NO<sub>2</sub>)浓度应在8毫克/米<sup>3</sup>以下。

内燃机车或蒸汽机车通过长隧道时, 隧道空气中氮氧化物和一氧化碳的污染浓度一般都超过卫生标准。因此必需用通风办法及时引入洁净的新鲜空气将污浊空气排出隧道之外。

### 三、空气的状态方程与状态参数

在研究通风问题时往往要涉及到空气的物理状态, 而空气的物理状态常用密度  $\rho$ 、压强  $p$  和绝对温度  $T$  (开氏温度) 三个物理参数来表示。对不含水汽的干空气或未饱和的湿空气, 其密度、压强和绝对温度三者之间的关系基本上符合理想气体状态方程, 即

$$\frac{p}{\rho T} = R \quad (0-1)$$

式中  $R$  —— 比气体常数, 如采用国际单位制, 其值为: