

# 铁路隧道运营通风

TIE LU SUI DAO YUN  
YING TONG FENG

中国铁道出版社

36.4921  
3120

# 铁路隧道运营通风

铁道部第二勘测设计院 编

中国铁道出版社

1983年·北京

## 内 容 简 介

本书根据多年来国内外的试验研究成果，对铁路隧道运营通风的理论与实践进行了系统的总结，对风量分配的理论有较为详细的论述。书中除分析论述有关设计计算方法外，并附有必要的设计资料，对常用的通风方式以算例的形式予以说明。

本书可供隧道及地下铁道工程技术人员、有关大专院校师生参考。

## 铁路隧道运营通风

铁道部第二勘测设计院 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 刘曼华

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：850×1168 $\frac{1}{16}$  印张：13.25 插页：1 字数：341千

1983年3月第1版 1983年3月第1次印刷

印数：0001—2,000册 定价：2.45元

## 前 言

新中国成立以来，随着山区新建铁路的不断增加，山岭隧道的修建也日益增多，目前，在我国五万多公里的铁路总长中，隧道总长已达二千多公里。

由于长隧道的大量修建，引起了设计、科研、运营各部门对隧道通风问题的重视。二十多年来，国内许多单位对此作了试验和研究，积累了相当丰富的试验资料和研究成果。本书即把这些试验资料和研究成果系统化，并从理论上予以分析和说明。

本书由滕兆民主编，第一、二篇由徐宝贤编写，第三、四、五篇由张开鑫编写，参加工作的人员有：刘茂桑、郑先才等通风组同志。

铁道部第二勘测设计院  
隧道通风研究组

1981年11月

## 目 录

隧道运营通风发展概况	1
<b>第一篇 隧道内空气状况</b>	<b>8</b>
<b>第一章 气压、气温、气湿</b>	<b>8</b>
第一节 大气压力	8
第二节 空气温度	10
第三节 空气湿度	13
第四节 通风计算中应用气象资料的分析	15
<b>第二章 列车通过隧道时的烟气</b>	<b>17</b>
第一节 机车排放的烟气成分及其危害	17
第二节 列车通过隧道时烟气的分布情况	24
<b>第三章 隧道内空气的卫生标准与有害气体的防治措施</b>	<b>42</b>
第一节 卫生标准	42
第二节 隧道内有害气体的防治措施	44
第三节 改进卫生标准的研究	48
<b>第二篇 隧道通风中流体力学的应用</b>	<b>50</b>
<b>第一章 有关流体力学的一些基本知识</b>	<b>50</b>
第一节 流体的物理性质	50
第二节 管道内流体的运动状态	53
第三节 稳定流三项基本定律	58
第四节 风压与风阻	64
第五节 稳定流三通管的计算	73
<b>第二章 隧道风流的各项压源</b>	<b>94</b>
第一节 自然风压	94

第二节	列车活塞风压	97
第三节	机械风压	102
第四节	多项风压压源的串接	109
第五节	隧道内风速随时间变化时的计算	113
第三章	自然通风	124
第一节	单一的隧道	124
第二节	有竖井(斜井)的隧道	141
第四章	机械通风	146
第一节	概说与分类	146
第二节	单坡隧道机械通风	152
第三节	提前通风	169
第四节	人字坡隧道洞口风道式通风	179
第五节	竖井通风	182
第六节	分段式通风	185
第三篇	通风机及机电设备	188
第一章	通风机及性能曲线	188
第一节	概述	188
第二节	轴流风机的构造及工作原理	189
第三节	风机的特性	193
第四节	风机特性曲线的应用	209
第二章	常用风机与机电设备的使用效果	216
第一节	风机使用概况	216
第二节	70B <sub>2</sub> 型风机	216
第三节	50A <sub>4</sub> -11型№22风机	227
第四节	其它型号风机	230
第五节	风机使用情况分析	234
第六节	风机使用的动力及附属设备	235
第七节	设计施工注意事项	242
第三章	帘幕与有关设备	242
第一节	帘幕	242

第二节 帘幕控制设备 .....	244
第四章 通风设备的安装、维护与管理 .....	248
第一节 风机的安装 .....	248
第二节 设备维修与管理 .....	250
第四篇 设计原则与计算示例 .....	252
第一章 规范、设计原则与设计计算细则 .....	252
第一节 规程、规范摘录 .....	252
第二节 设计原则 .....	254
第三节 风道、风机与动力设备中应注意的事项 .....	256
第四节 设计计算细则 .....	257
第二章 设计计算示例 .....	285
第一节 自然通风检算 .....	285
第二节 机械通风算例 .....	293
第五篇 通风试验 .....	353
第一章 现场试验 .....	353
第一节 试验条件及试验项目 .....	353
第二节 现场试验 .....	355
第三节 其它设备 .....	398
第二章 模型试验 .....	398
附录 局部阻力系数表 .....	408
参考文献 .....	413

## 隧道运营通风发展概况

### 一、国 外

铁路隧道运营通风（机械通风）在国外已有一个多世纪，首先是在西欧发展起来的。

开始时（1826~1893），有利用竖井的烟囱作用进行自然通风的。如英国的利物浦（Liverpool）隧道（全长1852米），为了增加竖井的通风效果，曾在竖井底部烧火加热以促进空气的流动，使机车烟气经由竖井排出隧道外。又如博克斯（Box）隧道（全长2750米），为了排出烟气，曾试图采用双线隧道衬砌断面，以增大隧道内的净空，并利用5个竖井进行通风，因效果不大，随后即采用机械通风。

1894年，萨卡斗（Saccardo）提出在隧道衬砌周边装置环形小风道口的喷嘴通风设计方案，称为萨卡斗通风方式，简称萨氏通风或喷嘴通风。此种通风方式，最初应用于意大利的普拉奇（Plagie）隧道（2727米），随后，仙尼斯峰（Mont Cenis）隧道（12849米）、圣哥达（St. Gothard）隧道（14998米）、考奇姆（Cochem）隧道（4203米）、陶恩（Tauern）隧道（8551米）和伦可（Ronco）隧道（8298米）等都曾采用，十九世纪末在西欧颇为风行。但由于风机动力消耗大，实际效果也不理想，未能继续推广使用，后即被竖井式和有帘幕洞口风道式的机械通风所代替。如1906年建成的辛普伦（Simplon）\*1隧道（全长19780米），便是采用洞口帘幕吹吸联合的通风方式，利用施工中的平行导坑作为风道，隧道两端均设置帘幕，在平导两端设风机，从一端吹入新鲜空气，同时由另一端吸出烟气。

1917~1946年间，西欧各国的铁路网已基本形成，在铁路隧



道通风方面并无多大发展。随着铁路运输量的增加，机车类型开始采用牵引力大的电力机车，以提高通过能力，长隧道内烟气问题不复存在，如圣哥达、仙尼斯峰、勒辰堡（Lötschberg）隧道（14612米）等不少长隧道，在电化后便不再使用机械通风。只有辛普伦\*1等隧道，由于地温较高、湿度较大等原因，在电化后继续采用机械通风。

在美国和加拿大，由于牵引动力一度由电力改为内燃，曾对内燃机车牵引的隧道通风问题进行过一些研究〔1〕。如美国的胡萨克（Hoosac）隧道（7645米）于1911年开始电化，而后又改为内燃牵引，并于1946年采用在竖井内装置轴流风机的竖井式机械通风；1929年建成的喀斯喀特（Cascade）隧道（12536米），交付运营后一直采用电力牵引，1956年改为内燃牵引时，研究了兼顾排除烟气与解决机车超热的通风方案，采用了洞口风道式机械通风，配置有自动遥控启闭的帘幕装置；加拿大的圣克拉尔（St. Clair）隧道（1840米），在由电化改为内燃牵引时，专门对内燃机车烟气成分作了测定研究。

在日本，隧道通风的设置稍晚，但研究工作做得不少。1930年左右，在东山隧道（1865米）采用萨卡斗式通风，首次进行了现场试验，测定了隧道周壁的摩擦系数。四十到五十年代，主要是研究单线铁路隧道气流运动规律与解决蒸汽机车牵引的隧道通风问题。在洞口帘幕式和喷嘴式通风方面有不少经验，也有不少调查研究资料，可资借鉴〔2〕〔3〕〔4〕。其中有：1941年村山朔郎发表的《隧道内气流的理论研究》，文中就铁路隧道排烟问题，对自然通风、列车活塞作用在隧道中产生的气流状况以及机械通风等问题，作了系统的论述。1951~1952年，前川力通过模型试验，论证了萨卡斗式通风小喷嘴不如加大风道口有利的观点〔5〕。六十年代，随着铁路内燃化，通风研究也转为以内燃机车牵引与双线隧道为主，调查和研究了内燃机车排出烟气中有害气体的成分及其对隧道内空气的污染问题。如1964年，福地合一在《长隧道内的内燃机车排气问题》的研究报告中，以亲不知隧道（长4536米，

双线)的通风设计为对象,详细论述了双线隧道内列车活塞风的计算与烟气浓度的积累问题〔6〕。酒井恒美的《内燃机车废气对隧道内空气污染的调查研究》,通过对北陆隧道(长13871米,双线)两次试验测定的结果与分析,论述了各种有害气体在隧道内、司机室及守车内的分布情况以及对人体健康的影响〔7〕。七十年代,针对某些长大隧道遭遇地热与电力牵引下隧道气温逐年上升问题,隧道降温问题也列入了隧道通风的课题范围,如日本福地合一就此课题以青函海底隧道(53850米)为对象作了研究,利用施工平导与竖井设计了分段通风方案〔8〕。又如瑞士哥达低线铁路隧道(长48670米)也以冷却隧道气温为通风目标,目前正在设计中〔9〕。

此外,随着高速列车的出现,列车进入隧道时及进入隧道后的隧道内空气动力阻力问题显得突出了,这方面的试验研究资料也日益丰富。这些研究虽不属通风的范围,但对列车活塞作用有关系,可能由此而使得列车活塞作用的研究深入一步。

## 二、国内

1953年,我国在丰沙线7座1公里以上的隧道,以及1955年,在宝成线10座1公里以上的隧道均设计了运营通风装置,其中多数隧道采用了有帘幕洞口风道式,个别隧道采用了环形喷嘴式、竖井式。对通风量的计算,用“挤压理论”与“冲淡理论”两种方法,两者均未考虑列车的活塞作用。

1957年,铁路专业设计院等单位在丰沙线7座隧道进行通风试验后认为:(1)1.5公里以下的隧道可不设机械通风;(2)通风量应按“挤压理论”计算,并应考虑列车活塞作用的利用(关于活塞风的计算方法,介绍引用了苏联的阿布拉莫维奇公式);(3)通风速度不宜低于3米/秒〔10〕。

1958年前后,有三座隧道安装了不同方式的通风系统:石太线东武庄隧道(长1377米)采用无帘幕喷嘴式通风;京承线夹马

石隧道（长2387米）采用竖井吸出式通风；长林线（浑湾线）枫叶岭隧道（长2300米）采用斜井吹入式通风（也可用作吸出式）。1959年，铁道部组织了通风试验工作组对上述三座隧道进行了现场试验<sup>[11]</sup>，通过试验，认为东武庄隧道的喷嘴通风效果良好。由于该隧道较短，不需机械通风。

同时期，北同蒲线段家岭隧道（长3350米）安装了有帘幕洞口双侧风道吸出式通风系统。1959年，铁道部第三勘测设计院在此对有帘幕、无帘幕、吹入式、吸出式等通风方式作了试验对比<sup>[12]</sup>。1964年，铁道部第一勘测设计院、北京铁路局等单位也在此测定了有帘幕吸出式的通风效果与关帘幕后在隧道内行车的情况<sup>[13]</sup>。

1957年12月至1959年5月，铁道部第一勘测设计院在宝成线秦岭隧道（长2366米）进行了竖井自然通风的观测，历时一年多，试验结果认为，竖井不仅无助于自然通风，相反还常使隧道内烟气阻滞，对自然通风不利，因此封闭了竖井<sup>[14]</sup>。

五十年代末，由于要开始使用内燃机车，提出了内燃机车牵引的隧道内烟气成分、浓度及其卫生标准的问题。开始时曾以丙烯醛的浓度作为衡量隧道内环境卫生标准的指标<sup>[16]</sup>，先后有北京铁路局、南京铁道医学院、铁道部劳动卫生研究所等单位，作过大量的调查、试验和研究工作。尔后，通过1965~1967年在凉风垭等隧道的试验测定和分析，确定以氮氧化物（ $\text{NO}_x$ ）的浓度为衡量卫生标准的控制指标<sup>[17]</sup>，并列入1975年铁道部颁《铁路工程技术规范第三篇隧道》（以下简称《隧规》）。

1961年底，“全路隧道运营通风专业技术会议”在成都召开，总结了建国以来的隧道通风设计、运营和试验研究的经验，并由铁路专业设计院拟订了《蒸汽机车及内燃机车牵引铁路隧道运营通风设计原则（初稿）》，作为隧道通风设计的依据。

1963年，铁道部组织了隧道通风试验工作组，在宝成线阳平关、恩哥石、桃园、禅觉寺与东北的老爷岭、第一北老岭、福金岭和分水岭等隧道，进行了自然通风的调查与观测试验<sup>[18]</sup>，并

将列车活塞风计算公式改用美国R.L.道格提 (Daugherty) 在莫法隧道计算中所用的公式形式<sup>[19]</sup>, 而根据实测资料统计整理出列车阻力系数 $N$ 值, 用以代替阿布拉莫维奇的计算式。所改用的公式与列车阻力系数 $N$ 值, 至今一直在设计中沿用。

五十年代, 通风设计或现场试验中所用的风机, 大都为Y-20型轴流风机, 间或有用CTД-57型离心式风机与BY型轴流风机(后改为70B<sub>2</sub>型)者。后来, 沈阳鼓风机厂根据铁路隧道通风需要风压低、风量大的要求, 试制了50A<sub>4</sub>-11型№22轴流风机, 1965年开始提供产品, 嗣后铁路隧道的运营通风即普遍采用此种型号的风机。但在使用中, 尚存在一些问题, 有待于进一步研究改进。

1965年, 西南铁路建设指挥部组织了“隧道运营通风战斗组”, 于1965~1966年间, 在川黔线凉风垭、贵昆线岩脚寨等隧道, 进行了自然通风、列车活塞风、机械通风、内燃机车废气浓度、机车温升、隧道内地层瓦斯等多方面的测定与劳动卫生防护的研究, 取得不少资料, 并于1966年10月, 在贵州桐梓召开了“隧道运营通风成果报告审查会”。与此同时, 隧道运营通风战斗组还进行了内燃机车废气净化的研究, 因未有更多进展, 即告停顿。

1962年, 铁道部第一勘测设计院在宝成线站儿巷隧道作了喷嘴式迎列车通风试验, 试图用以解决蒸汽机车浓烟侵入司机室的问题, 因风机能力不足, 未得预期效果<sup>[20]</sup>。

研究人员曾设想用空气幕代替刚性帘幕的通风方式, 以解决刚性帘幕存在的弱点。1965年, 铁路专业设计院为此作了隧道洞口空气幕的模型试验<sup>[21]</sup>; 1966~1968年, 铁道部第三勘测设计院又在丰沙线\*16隧道进行了现场试验, 因效果不佳, 遂即终止。

1963年, 铁道部第四勘测设计院按一座长隧道的设想方案(洞内喷嘴式通风)进行了模型试验研究, 并于1965年11月提出《铁路隧道运营通风洞内喷嘴方案的模型试验研究报告(初稿)》。报告中用动量方程列出风量分配比( $R$ )的特性方程<sup>[22]</sup>。虽然由于试验条件的限制、测试数据的误差等原因, 未能准确地验证方程的定量关系, 但对喷嘴通风风量分配的计算原理, 已有

进一步的认识，对无帘幕通风的研究跨出了一大步。

1965~1971年，铁道部第二勘测设计院在凉风垭和岩脚寨等隧道对无帘幕洞口风道吹入式的通风效果进行了现场实测，对风道口大小与风量分配的关系取得一些现场试验的经验数据<sup>[23]</sup>，对隧道长度、风道口面积和自然风等因素对风量分配的影响，得到一些相同的认识，但未能从理论上予以分析。此后在成昆等线不少无帘幕洞口风道吹入式的通风设计中，引用了岩脚寨隧道现场试验的经验，改小了风道口。

通过六十年代隧道通风的试验与研究，于1972年底在成都召开了“长隧道运营通风经验交流协作会议”，交流了经验，协商了试验研究的协作计划，其后主要开展了三方面的课题研究：

(1) 继续研究无帘幕洞口风道式通风的设计计算问题；(2) 内燃机车牵引运营隧道内空气中有害气体的容许浓度问题；(3) 铁路隧道运营通风适用的风机配套问题。

1973年，铁道部第二勘测设计院通风组与西南交通大学水力学教研室在学习和研究了国内外对此课题的一些论述之后，应用动量方程的原理，提出无帘幕风道吹入式通风的风量分配公式。为纠正以往机械风与自然风合成的计算方法的错误，西南交通大学水力学教研室进行了自然风对隧道通风影响的理论分析。随后进行了现场试验与模型试验<sup>[24][25][26][27]</sup>，反复对风量分配公式作了系统的测定分析和验证，所有试验均证实了公式推导原理的正确性与实用上的可靠性。根据这些试验结果，把风量分配公式又推广到：有列车在隧道内行驶时开风机通风的情况，推导出提前通风的计算公式；提出了特长隧道中无帘幕分段通风的设计及设计计算方法，并应用于某工程的方案比较计算<sup>[28]</sup>。

根据吹入式风量分配公式，铁道部第二勘测设计院于1977年编制了《单线铁路隧道运营通风参考图》。

在以往的铁路隧道设计规范中，隧道内空气的卫生标准是沿袭厂房通风所采用的稀释有害气体的容许浓度作为标准，这显然与隧道实际情况不符。经有关部门研究，在有害气体容许浓度值

中，已考虑了铁路隧道与厂房的区别，但隧道内排烟过程与挤压式通风的特点，尚未得到确切的反映。

为使制订卫生标准进一步合理化，铁道部劳动卫生研究所从1965年起，在川黔线、贵昆线一些隧道开始进行试验研究；1973~1975年间，又在成昆线进行了现场调查试验，并以柴油机废气模拟现场浓度情况，在室内对动物进行毒性试验。根据铁路隧道的特点，提出了《关于运营隧道内空气中内燃机车废气容许浓度的建议》，建议用日平均浓度与一次短时间内的平均浓度两项数值作控制指标<sup>[17]</sup>。

1973年起，铁道部第三勘测设计院对通风配套进行了大量的计算分析和调查研究工作，于1977和1978年先后提出了《单线铁路隧道运营通风风机配套技术参数选择报告》和《单线铁路隧道运营通风方式及参数的分析》，建议按三种型号组成一套隧道通风专用风机系列，并列出了每种型号风机的主要技术参数和适用范围。

在七十年代除上述研究成果外，各单位还作了不少试验研究工作。1973~1975年，成都铁路局与西南交通大学试验研究了氮氧化物的测试与计量方法。1975年，成都铁路局和铁道科学研究院西南研究所在成昆线进行了大量的试验工作，测定了一些隧道内有害气体的浓度分布状况。1976年底，铁道科学研究院等在成昆线进行了燃气轮机车通过隧道时的性能试验，同时测定了废气浓度与内燃机车废气的对比资料。

1978年，北京铁路局在京承线夹马石隧道实现了机械通风自动化，这是我国第一个铁路隧道通风自动化装置，对我国铁路隧道通风现代化，将起重要的推动作用。

铁路电化后，长隧道是否还要机械通风？国内外一般的看法是不需再设机械通风。但也有国外资料认为电力机车牵引的隧道内，仍有少量有害气体存在，需要进行定时的通风。为弄清这方面的问题，铁道部第二勘测设计院于1979年在宝成线会龙场隧道（全长4009米），进行了对电力机车通过隧道后，隧道内空气中氮氧化物含量的测定，取得了我国自己的首批测定资料<sup>[29]</sup>。

# 第一篇 隧道内空气状况

## 第一章 气压、气温、气湿

### 第一节 大气压力

由于地球周围大气的重量而产生的压力叫大气压力，简称气压。气压的单位是用气压表中水银柱的高度以毫米为单位来表示，称为毫米汞柱。在北纬45°、温度为0°C、作用在海平面上的大气压力为760毫米汞柱高度时，称为标准大气压，也叫物理大气压，简称大气压。

因为0°C时每立方厘米水银的重量为13.6克，所以标准大气压的压力值为1033.3克/厘米<sup>2</sup>。若取其整数1000克/厘米<sup>2</sup>作为计量单位（即每平方厘米上的压力为1公斤）以便于计算，则称为工程大气压。为避免不同地区重力加速度差别的影响，工程中又采用巴（bar）为压力单位，1巴相当于1平方厘米面积上受到一百万达因（dyne）的压力，或相当于750.1毫米汞柱高的压力。千分之一巴称为毫巴（mb）。

表 1—1

	大气压	工程大气压	毫 巴	毫米汞柱	毫米水柱	公斤/厘米 <sup>2</sup>	公斤/米 <sup>2</sup>
大气压		1.033	1013.25	760	$1.033 \times 10^4$	1.033	$1.033 \times 10^4$
工程大气压	0.9678		980.8	735.5	$1 \times 10^4$	1	$1 \times 10^4$
毫 巴	$0.987 \times 10^{-3}$	$1.02 \times 10^{-3}$		0.7686	10.2	$1.02 \times 10^{-3}$	10.2
毫米汞柱	$1.32 \times 10^{-3}$	$1.36 \times 10^{-3}$	1.3332		13.6	$1.36 \times 10^{-3}$	13.6
毫米水柱	$0.968 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	0.0981	0.0736		$1 \times 10^{-4}$	1
公斤/厘米 <sup>2</sup>	0.9678	1	980.8	735.5	$1 \times 10^4$		$1 \times 10^4$
公斤/米 <sup>2</sup>	$0.968 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	0.0981	0.0736	1	$1 \times 10^{-4}$	

各种不同压力计量单位之间的换算关系如下：

由于气压主要是受空气的重量作用所形成，随着高度的上升，大气层的厚度逐渐减薄，空气的密度在减小，使得气压也在减小。例如，在靠近地面附近（一般地区）每上升100米气压约降低10毫巴。

气压除受高程因素影响之外，尚与所在位置的纬度及温度有关。一般随着温度的升高而降低。根据对两个等压面之间垂直空气柱重所形成之压力的计算，德国的约尔旦导出了两点高程和两点气压之间关系的计算式：

$$Z_2 - Z_1 = K(1 + \alpha t_{c.p.}) \left(1 + 0.377 \frac{e_{c.p.}}{P_{c.p.}}\right) \cdot \left(1 + \frac{2H_{c.p.}}{6370}\right) (1 + \beta \cos 2\varphi_{c.p.}) \cdot 1g \frac{P_1}{P_2} \quad (1-1)$$

式中  $Z_1, Z_2$ ——已知两点的高程（米）；

$K$ ——比例系数，可采用18400；

$\alpha$ ——气体的体膨胀系数， $\alpha = \frac{1}{273}$ ；

$t_{c.p.}$ ——已知两点的平均温度（°C）；

$e_{c.p.}$ ——已知两点的平均水蒸汽分压（毫米汞柱）；

$P_{c.p.}$ ——已知两点的平均绝对大气压（毫米汞柱）；

$H_{c.p.}$ ——已知两点的平均高程（公里）（近似到0.5公里）；

$\beta = 0.00265$ ；

$\varphi_{c.p.}$ ——已知两点的平均纬度（度）（近似到1°）；

$P_1, P_2$ ——已知两点的绝对大气压（毫米汞柱）。

式中  $t_{c.p.}$  值是考虑两点间温度的影响，在两点高差及温度变化都不太大时，则近似取  $t_{c.p.} = \frac{1}{2}(t_1 + t_2)$ ； $e_{c.p.}$  值是考虑空气湿度的影响，一般影响不大，可略而不计； $H_{c.p.}$  是考虑高程对重力加速度  $g$  的影响，可略去；由此可得，对于已知两点的高程，



由一点的气压推求另一点气压的较简便的计算式:

$$\lg \frac{P_1}{P_2} = \frac{Z_2 - Z_1}{K(1 + \alpha t_{c,p})(1 + \beta \cos 2\varphi_{c,p})} \quad (1-2)$$

## 第二节 空气温度

空气的温度主要取决于太阳的辐射热。太阳的辐射能穿过大气层时,被空气吸收的热量并不多,大部分均为地面所吸收,随后地面又把一部分热能以辐射的方式传给空气。高层空气通过空气的对流而获得热量,靠近地面的热空气上升,高层的冷空气下降而形成对流。对流层中的气温随高度增加而降低,其降低的程度,用温度的垂直递减率来表示。通常,空气在上升时发生绝热冷却,如果上升的是未饱和的空气,则由于绝热冷却每升高 100 米时,空气的温度约降低  $1^\circ\text{C}$ ; 如果上升的是饱和空气,则其递减率由气温和气压来决定,温度高于  $0^\circ\text{C}$  时,其递减率一般约为  $0.65^\circ\text{C}$ 。

### 一、隧道内空气温度

隧道内空气温度除与大气温度有关外,还受地层温度和机车散热以及其他人为热源(如照明,养护维修时的动力等)的影响。

#### (一) 地层温度

地层的温度与隧道埋藏深度、地形状况以及地表温度等密切相关,也受地质构造及水文地质情况、岩石的矿物成分等因素的影响。当隧道开挖后,围岩的温度将与隧道内空气的温度不断进行热交换。气温变化对地层温度的影响,一般只达地表以下 25~30 米的范围,在此范围内地层的温度可采用地区的常年平均温度。其下为不受气温变化影响的地层称为常温带,由此再向下延伸,地层温度将随深度的增加而增加,每升高  $1^\circ\text{C}$  所增加的深度称为地温率。对不同深度的地层温度可用下式作近似估算:

$$t_n = t_{c,p} + \frac{H_n - h_k}{h_c} \quad (1-3)$$