

高等学校试用教材

GONGLU SUIDAO YUNYING SHESHI

公路隧道运营设施

(公路、桥隧及交通工程专业用)

吕康成 主编

朱光仪 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本教材系统地介绍了公路隧道运营设施的基础理论和设计方法。全书共五章,内容包括隧道运营通风、照明、防火、交通监控以及隧道给排水、供电和隧道控制室等。本教材适用于公路、桥隧、交通工程的公路隧道与地下工程专业方向,亦可供有关工程技术人员参考。

高等学校试用教材

公路隧道运营设施

(公路、桥隧及交通工程专业用)

吕康成 主编

朱光仪 主审

插图设计: 版式设计:周 园 责任校对:尹 静

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街10号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 字数: 千

199 年 月 第 版

199 年 月 第 版 第 次印刷

印数: 册 定价:15.00 元

ISBN 7-114- -

前 言

本教材系以 1996 年 11 月交通部公路、桥隧、交通工程专业教材编写大纲讨论会所确定的《隧道运营设施》教材大纲为依据,吸取西安公路交通大学隧道运营设施课程教学经验,广泛收集资料的基础上编写的。

本教材编写过程中,力求内容全面、取材先进,注意理论与实践并重,围绕公路隧道运营设施的设计,重点突出基本概念、原理和方法。

本教材由西安公路交通大学吕康成主编,交通部第二公路勘察设计院朱光仪主审,西安矿业学院张恩强参加编写。具体分工是:张恩强、吕康成编写第一、三章;吕康成编写绪论、第二、四、五章。

本教材编写过程中,兄弟院校对编写大纲提出了宝贵意见和建议;西安公路交通大学于书翰、李宁军给予了很大帮助,在此一并致谢。

由于水平有限,本书在内容和编排上错误与不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1998 年 7 月

目 录

绪论.....	1
第一章 隧道运营通风.....	7
第一节 空气的物理性质.....	7
第二节 理想气体的状态方程	13
第三节 隧道内空气流动的基本规律	17
第四节 隧道通风阻力	22
第五节 隧道通风标准	27
第六节 隧道内自然风流	31
第七节 隧道内交通风流	37
第八节 隧道通风量	38
第九节 隧道通风方式	43
第十节 纵向通风压力计算	49
第十一节 风道系统	54
第十二节 半横向与横向通风压力计算	58
第十三节 通风机	65
第十四节 风井、风洞与通风机房.....	74
第十五节 隧道通风控制	76
思考与练习	80
第二章 隧道运营照明	81
第一节 概述	81
第二节 光与光度量	82
第三节 材料的光学性质	87
第四节 司机的视觉及其影响因素	90
第五节 道路照明的质量	97
第六节 照明区段划分与亮度曲线.....	100
第七节 减光建筑与植被的减光作用.....	103
第八节 隧道照明电光源与照明器.....	105
第九节 照度计算基本方法的特点及适用范围.....	110
第十节 点光源直射照度计算.....	111
第十一节 线光源直射照度计算.....	117
第十二节 隧道照明计算.....	124
第十三节 隧道照明设计的程序与要求.....	128
思考与练习.....	130
第三章 隧道防火设施.....	131

第一节	概述.....	131
第二节	隧道防火设施的组成和各种设施的功用.....	132
第三节	隧道内防火设施的设置.....	133
第四节	人工报警系统.....	137
第五节	火灾自动报警系统.....	139
第六节	火灾的种类与灭火剂的适用性.....	143
第七节	灭火器.....	144
第八节	灭火器的配置.....	147
第九节	其它灭火设施.....	153
	思考与练习.....	156
第四章	隧道交通监控.....	157
第一节	交通检测器.....	157
第二节	交通电视监视系统.....	160
第三节	交通信号控制系统.....	163
第四节	紧急警报装置.....	166
	思考与练习.....	169
第五章	其它设施.....	170
第一节	给水.....	170
第二节	排水.....	171
第三节	隧道供电.....	173
第四节	隧道控制室.....	177
	思考与练习.....	178
	参考文献.....	179

绪 论

一、公路隧道运营设施的产生与发展

1. 运营设施的产生

汽车工业的发展带动了公路交通的发展,公路隧道作为公路路线的基本组成部分,与公路建设同步发展。隧道在山岭地区可用于克服地形与高程障碍,改善线形,缩短里程,减少对植被的破坏,从而提高车速,节约燃料,节省时间并保护生态环境;在山岭地区,隧道还可用于避免落石、坍方、雪崩、雪堆和冰冻等对路线造成的危害。在城市,隧道可用于减少道路用地,构成立体交叉,疏导交通。在江河、海峡和港湾地区,用隧道“涉水”,既能保证路线平顺,又可保证航道畅通。隧道在特定条件下具有其它路线方案难以替代的作用,所以隧道在高等级公路上广泛应用,而且隧道的适用环境越来越复杂,隧道越建越长。隧道工程的这些发展趋势,在给公路交通创造有利条件的同时,也给隧道的运营管理带来了以下问题:

1) 通风

汽车通过隧道时,要不断地向隧道内排放废气。对于短隧道,由于受自然风和交通风的影响,一般来说有害气体的浓度不会积聚得过高,不会对司机的身体和行车安全构成威胁。但是,对于长大隧道情况就不同了,自然风和交通风对隧道内空气的置换作用相对减小,如不采取措施,隧道内有害气体的浓度就会逐渐升高,其中的CO浓度达到一定量值时会使人感到不适以至窒息;柴油车排出的煤烟将不断恶化行车环境,使隧道内可见度降低,因此,必须根据长大隧道的具体条件,采用适当的通风方式,将新鲜空气随风流一起送入隧道,稀释淡化有害气体,使其浓度降至安全指标以内。

2) 照明

高速行驶的汽车穿过长大隧道时,生理基础决定了司机的视觉要发生微妙的变化。尤其在白天,汽车接近隧道时,由于环境亮度突然由高变低,司机视觉上要出现“黑洞效应”,对安全行车极为不利;出洞时则相反,亮度迅速由弱变强,视觉上出现眩光而倍感不适。因此,为了减轻司机的心理与生理压力,有利安全行车,需视具体情况,对长大公路隧道进行合理有效照明。

3) 防火

隧道内空间狭长,能见度通常较低,加上入洞时的黑洞、黑框效应以及洞内的墙效应,隧道内常为事故多发段,并诱发各种各样的火灾。由于空间结构上的特殊性,隧道内火灾烟气难以垂直向上排出,而只能从有限的通风口排出,所以极易沿隧道纵向水平扩散,给扑救带来不便。往往很小的火情,也会诱发大的火灾,所以,必须根据隧道结构上的特殊性,采用适宜的防灭火系统。

4) 交通监控

高等级公路上的长大隧道,其交通管理十分重要。一旦隧道内发生某种交通事故,不仅要及时发现,迅速处理和救援,而且还要对洞内外的交通进行疏导和管制。为了避免混乱,要求

隧道的交通监控与指挥系统尽量自动化,以便救援工作紧张而有序地进行,尽快恢复正常交通。

为了解决上述问题,需要在公路隧道主体结构内外建设和安装相应的附属设施,包括通风设施、照明设施、防火设施、交通监控设施、供配电设施和给排水设施等,我们把这些附属设施通称为隧道运营设施。

2. 国外隧道运营设施的发展

隧道运营设施随着长大隧道的出现而出现,对于它的研究也随着长大隧道的发展而不断深入。

1919年,美国修建横穿纽约哈德逊河的厚兰德隧道时,以美国矿山局为主,在一些大学和研究所的协助下,对当时美国汽车的CO发生量进行了比较彻底的研究,同时还就人体对CO浓度的容许值进行了研究,并以此作为隧道通风计算的依据。后来,他们又发现,当大马力柴油机货车在交通流中占比例增大时,排烟量增大,烟尘使隧道内空气透明度降低,从而影响安全行车,稀释烟尘所需风量,有时会超过稀释CO所需风量。60年代以后,在新建和改建隧道时,通常按稀释CO和稀释烟尘分别计算风量,并取其较大值作为设计依据。

以风量计算为基础,厚兰德隧道采用了人工通风,新鲜空气由通风机从车道两侧下方吹入,污染空气由通风机从车道中央的顶棚抽出,从而形成了世界上最早的人工全横向通风方式。采用这种通风方式后,隧道内空气中的CO小于容许浓度时,烟尘浓度也比较小。这种通风方式在大交通量的长大隧道中,至今仍在采用。这种通风方式供风均匀,可见度好,有利于防止火灾。由于全横向通风投资大,耗电量高,在探索减少投资的过程中,主要是试图减少造价昂贵的通风道。1934年英国修建的墨尔西隧道($L = 3226\text{m}$)首先采用了半横向通风,将通风技术向前推进了一步。

40年代初,德国人梅氏对CO毒性作了更加深入的研究,结果表明人对CO的中毒程度与人的活动状态有关。他得出CO浓度、人吸入的时间以及活动状态与CO—Hb的饱和率之间的关系曲线。

日本多山多水,长大公路隧道较多。其隧道通风技术与西方发达国家相比起步较晚,但大有后来居上之势。1958年修建的关门隧道($L = 3461\text{m}$),1975年修建的惠那山一线隧道($L = 8489\text{m}$)均采用了全横向通风。1963年建成的天王山隧道($L = 1435\text{m}$),采用半横向通风。在石油危机的年代,开始研究试验长大隧道能否采用节能的纵向通风。1984年建设的关越一线隧道、惠那山二线隧道($L = 8625\text{m}$)采用了结合电集尘器的竖井送排风纵向通风,开始了隧道通风的新纪元。其中,惠那山二线隧道的防灾和交通监控设施的现代化程度也很高,隧道的安全服务设施造价占隧道总造价的60%。

隧道照明是在一般道路照明的基础上发展起来的。围绕如何经济有效地解决司机视觉的暗适应与明适应问题,各国都进行了不同的试验研究,并就隧道的照明问题提出了各自的观点与设计参数。日本认为短隧道照明应比长隧道加强;CIE(国际照明委员会)认为凡长度超过50m的直线隧道,弯道上超过25m的隧道都需要照明。隧道照明分为白天和夜间两种情况来确定不同的亮度值,这是各国共同遵守的原则。隧道照明困难主要在白天,因此国外在洞外露天的一段距离采用减光措施,逐步将视野环境亮度降低,并在洞口加强照明缓和亮度的下降比例。为此,国外采取的做法是将隧道内外分成几个区段,根据行车速度提供不同的亮度值。以下是美国与日本的区段划分情况。

美国:无露天减光格栅时,入口区应划分为二个或二个以上区段,当洞外亮度为5000cd/

m^2 时,入口亮度至少为 $500\text{cd}/\text{m}^2$,第二区段至少为 $50\text{cd}/\text{m}^2$ 。这两个区段的通过时间应大于 2s 。如有露天减光格栅,则入口区的亮度为格栅区亮度的 50% ,入口区通过时间应为 2s (CIE72)。

日本:区段划分为引入段、适应段和过渡段。引入段为驶向隧道洞口的汽车司机能辨认出洞口外有无障碍物时所给的必要照明区段;适应段是司机由更接近隧道到进入隧道所必要的照明区段;过渡段是司机进入隧道适应隧道内部照明的必要照明区段(日本标准 76)。并在试验研究的基础上给出了各段的长度与车速的关系。1979 年日本出版了《隧道照明设计指南》,对隧道照明设计理论与方法进行了系统介绍。

发达国家公路隧道的迅速发展,大大地推动了对隧道运营设施的研究,从而使其作为一项重要工程技术不断得以发展与完善。

二、我国公路隧道运营设施的发展概况与前景展望

1. 发展概况

改革开放以前,我国公路等级普遍较低,仅在个别公路上设置了长度较小的隧道,隧道内一般采用自然通风,不设人工照明或仅挂几盏为行人照明的电灯。改革开放之后,随着我国经济的迅速发展,公路建设日新月异,公路等级普遍提高,长大公路隧道大量涌现,隧道运营设施也应运而生。

由于缺少修建长大公路隧道的经验,初期修建的梧桐山隧道($L = 2257\text{m}$)采用了横向通风方式,在山岭上设置了两眼送排风竖井。多年的运营经验表明,这种通风方式通风效果好,但能耗较大。洞内照明灯具为低压钠灯,其穿雾能力强,但洞内亮度不高。梧桐山隧道的设计与管理为我国后来的隧道设计提供了有益的经验。

80 年代中期,我国的一些新建公路隧道尝试半横向通风,如太原某隧道($L = 961\text{m}$)和沈阳某隧道($L = 1487\text{m}$),使隧道的运营费用较全横向通风有所降低。80 年代后期修建的甘肃七道梁隧道($L = 1560\text{m}$),首次在我国的长大公路隧道中采用射流风机纵向通风,为这种较为经济的通风方式在我国的广泛应用奠定了基础。

90 年代初,重庆修建的中梁山隧道($L = 3160\text{m}$),初步设计采用半横向通风,投资大,运营费用高,为了降低工程造价并确保建成后可靠、经济地运营,工程技术人员查阅了国外的大量资料并对国外的类似工程进行了重点考察,吸取国内有关隧道通风设计的经验与教训,经过反复试验、科学论证,最终在该特长公路隧道中采用射流风机加竖井吸出式纵向通风。几年来的运营实践表明,这种通风方式投资多,运营费用低,通风效果能满足有关规范与标准的要求。中梁山隧道的通风技术不仅为国内特长隧道的运营通风创出了一条新途径,其某些技术环节在世界范围内也属首例。此外,以中梁山隧道为代表的我国新建隧道,其防火设施、交通监控系统等均已接近国际先进水平。这些隧道采用各种感温、感烟和感光探测器探测洞内火情;闭路电视系统监视隧道内外交通;声、光及无线电交通指挥系统控制隧道交通;洞外设有完备的隧道监控中心与救援车辆。

1994 年建成通车的珠江隧道是我国的第一座大型沉管隧道,该隧道的顺利建成,标志着我国水下隧道的设计与施工技术水平又上了一个新台阶。特别值得指出的是,为了解决珠江隧道的照明问题,广州市地下铁道设计研究院、广州城建学院和浙江大学联合,对该隧道的照明进行了一系列研究。

该隧道在入口区采用人工加强照明,方法是采用大功率的照明灯具,使入口区路面亮度达到行车要求。在隧道洞口采用遮光棚,一方面减弱太阳光射到入口区的亮度,另一方面通过调整建筑高度或减弱司机在进入隧道入口区前的视野亮度。研究人员按隧道的初步设计尺寸,以 1:5 10 的比例制作了黄沙洞口遮光棚模型,并进行了为期一年的模型实测工作。试验分析报告指出:晴天视野亮度 $L = 5000\text{cd/m}^2$ 时,要消除“黑洞效应”,隧道入口段亮度必须在 250cd/m^2 以上,而且地处亚热带的广州一年四季晴天时间相当长,这么高的亮度如果完全采用电气照明来实现,势必造成运营成本高的问题。所以,采用建筑遮光棚代替入口段的灯光照明,无论从经济上,还是从节能角度考虑都是极为有利的。根据不同的天气情况和时间区段,珠江隧道将过渡亮度调节分为六级,其中过渡段四级,基本段二级。过渡段调节以洞口视野亮度为 100%,根据洞口视野亮度调节过渡段路面亮度。两端洞口装有视野亮度检测装置,将检测结果输入计算机,经分析后发出指令,由控制装置自动调节过渡段路面亮度。

目前正值我国公路隧道建设的高潮期,隧道不仅愈建愈多,而且愈建愈长,隧道的运营通风、隧道防灾与交通监控等问题比较突出。在建的大溪岭和二郎山等隧道,长度均超过 4000m,为了解决运营通风问题,重庆公路研究所对大溪岭等隧道的通风系统进行了模拟试验,根据试验结果,修正了原单一竖井送排风计算公式,确定了相应的设计计算参数。作为后期技术发展储备,重庆公路研究所已开始对隧道静电除尘设备进行开发研究,并取得了可喜的进展。

2. 前景展望

我国是一个多山的国家,75%的国土是山地或重丘,随着山岭重丘区高等级公路建设在我国广泛展开,公路隧道修筑规模正以空前的速度发展。此外,随着隧道技术的不断发展,一些大型海底隧道会在特定条件下显示其优越性。这些都将给运营设施提出特殊的要求,同时也为其发展提供了契机。为了今后能更好地发挥隧道的优势与作用,要着重研究解决公路隧道运营中的以下问题:

1) 特长隧道的通风方法和控制方式

随着隧道方案优越性的逐步被认识以及隧道技术储备的日益增加,我国公路隧道的长度记录不断被刷新,正在规划中的某些隧道长度将超过 6km。这些隧道的运营通风将是工程设计的焦点与难点,研究中需要综合考虑各种工程因素,参考国外同类工程的经验,结合我国国情,选择合理的通风方法与控制方式,开发有关的新技术。

2) 特长隧道的防火与救援

目前,隧道的防火系统设计或者是参考国外隧道,或者是借鉴一般工业与民用建筑,国内对此尚未进行深入系统地研究。特长隧道与一般隧道相比,火灾出现概率较大,扑救更难。所以,应结合工程具体情况,将隧道全长分成若干防火区段,根据各段出现火灾的可能性大小以及扑救的难易程度,分别布置火灾探测系统和自动灭火系统。根据需要开发研制隧道专用消防器材。

3) 严寒地区隧道的通风与供暖

我国幅员辽阔,西高东低,北冷南热,地理特征迥异,将有不少长大隧道修筑在严寒地区。实践证明,严寒地区的隧道极易出现渗漏与冻胀问题。该问题的解决办法之一是向隧道内供热送暖,保持隧道排水系统在严寒季节仍畅通无阻,从而避免渗漏与路面冰滑。为此,需要将进入隧道的新鲜空气预热,然后借助通风系统送入隧道。

4) 长寿命高性能隧道照明灯具的研制

隧道内空间狭小,交通繁忙,若照明灯具寿命短,维修量大,势必影响隧道正常运营。另外,隧道内的照明不仅是夜间需要,白天更离不开,灯具工作时间长,有些灯具甚至需要连续不断地工作,所以灯具光效的高低对运营费用影响很大。隧道内空气中烟尘浓度较大,这又要求照明灯具具有一定的抗污染能力。目前隧道内普遍采用光效较高的高压钠灯,其性能与寿命比较理想,如果能结合隧道内的特定环境条件,调整灯具的配光特性,则其使用效果更佳。

5) 隧道内空气的降尘与降毒

隧道内空气的特点是含烟尘、粉尘和 CO 等毒性气体,降低尘埃浓度和有害气体浓度不仅对提高隧道内空气质量有利,而且还减少了排放物对洞外空气的污染。降尘可采用静电吸尘或其它空气过滤系统,降毒则必须采用某些触媒来中和有毒气体的毒性,前者实施较易,后者实现较难。

6) 隧道智能化综合监控系统

随着隧道长度的增加和修筑环境的复杂化,隧道的运营管理更显重要。隧道的通风系统、照明系统、防火系统和交通监控系统等都是隧道综合监控系统的子系统,既有相对独立性,各子系统间又有一定的联系。例如,通风系统在正常情况下,要根据隧道内外的空气状况,控制风机的工作状态,使空气质量既能满足卫生标准,又能降低电耗。在出现火灾时,通风系统又与防火系统发生联系,根据火点的位置,火情大小,确定风机工作状态。这样的管理操作过程都应事先编好软件,设计好主控机的接口电路,由计算机自动完成。

与发达国家相比,我国的公路隧道建设起步晚,尽管近年来取得了可喜的成绩,但在设计理论和运营设施等方面和发达国家相比还有很大的差距。只要我们勤于学习,善于创新,不断进取,相信一定会在不远的将来,在隧道设计理论与运营设施等方面赶超世界先进水平。

三、课程的性质、内容与特点

1. 课程的性质与内容

《公路隧道运营设施》是隧道与地下工程专业的必修课,它主要以高等级公路上的长大隧道的运营设施为研究对象。基本内容包括:

- 1) 隧道通风量的计算
- 2) 通风方式的选择与各种通风系统的工作原理
- 3) 隧道通风阻力与风压计算
- 4) 隧道通风系统的设计
- 5) 隧道照明标准
- 6) 照明基本计算方法
- 7) 隧道照明光源与灯具的选择、布置
- 8) 隧道防火系统的构成和布置标准
- 9) 火灾报警系统的组成与工作原理
- 10) 隧道常用灭火设施
- 11) 隧道交通检测系统的组成
- 12) 隧道交通控制系统
- 13) 隧道供配电
- 14) 隧道给排水

围绕以上内容,介绍有关基本概念和基础知识,并结合我国现行的《公路隧道设计规范》介

绍有关标准。此外参照国内外隧道设计与运营中的成功经验,阐述运营设施的设计步骤与布设方法。

2. 课程特点与学习方法

本课程是一门综合性很强的专业课,它涉及学科较多,内容面广。它与空气动力学、电工学、电气照明、消防工程、自动控制、交通工程学、通信和给排水等课程密切相关。全书编排为板块结构,各章之间具有相对独立性。在学习中,应掌握基本概念,抓住重点,熟悉计算方法,了解设计步骤,注意归纳总结,注意理论联系实际。

《公路隧道运营设施》是一新设课程,在很多方面还不够成熟。随着我国公路隧道建设的不断发展,相信经过大家的共同努力,在安全、经济、适用原则的指导下,不论是这门课程的理论体系还是实用的设施系统都将逐渐得到完善与提高。

第一章 隧道运营通风

在隧道运营期间,为了有效地排放隧道内的有害气体及烟尘,保证司乘人员及洞内工作人员的健康,提高行车的安全性和舒适性,通常需要按一定的方式不断地向隧道内送入新鲜空气,此即隧道运营通风。本章介绍通风工程的基础知识,内容包括:隧道通风量计算,隧道通风方式选择,风道布置及通风阻力计算,通风机选型等。围绕这些问题,还将介绍空气的物理性质和空气流动的基本规律等。

第一节 空气的物理性质

空气是一种混合气体。隧道通风工程所涉及到的空气的主要成分是 O_2 、 CO_2 、 N_2 和水蒸汽等,其中 O_2 、 CO_2 和 N_2 之间的比例相对比较固定,而水蒸气的含量则变化较大。所以在讨论中常将 O_2 、 CO_2 和 N_2 的混合物看作一个整体,并称它为干空气,而将干空气与水蒸汽的混合物称湿空气。在以后的讨论中,若不特别说明,所提到的空气是指湿空气。

空气的物理性质很多,我们仅讨论其中与通风工程关系比较密切的一部分,如压力、温度、比容、粘性、湿度和比热等。

一、压 力

(一)压力的概念

气体的压力是指气体垂直作用于容器壁单位面积上的力。即:

$$P = \frac{F}{A}$$

式中: F ——气体垂直作用于容器壁上的力, N;

A —— F 作用的面积, m^2 ;

P ——气体的压力, N/m^2 ;

压力的单位 N/m^2 习惯上用 Pa 表示,即

$$1Pa = 1N/m^2$$

以前与国际单位 Pa 暂时并用的单位还有 atm(标准大气压), mmHg(毫米汞柱), mmH₂O(毫米水柱)和 at(工程大气压)等,它们与国际单位 Pa 之间的关系见表 1-1-1,目前,这些单位已取消,本书计算一律用国际单位制。

压力单位换算表

表 1-1-1

Pa	atm	mmHg	mmH ₂ O	at
1	0.99×10^{-5}	0.0075	0.102	1.02×10^{-5}
101325	1	760	10332	1.033
133.32	0.00132	1	13.6	0.00136
9.807	0.9678×10^{-4}	0.0736	1	0.0001
98067	0.9678	735.6	10^4	1

(二)压力的量测

1. 绝对压力、表压力、真空度

气体的压力可用各种仪表来测量,在隧道通风中,常用的仪表为“U”形压差计。“U”形压差计是一个装有液体(水或者水银)的“U”形玻璃管,如图 1-1-1 所示。测量时将一端与欲测压力的容器相联,另一端与大气相通。在容器内气体压力作用下,“U”形管两液面就会出现高差 $h(m)$ 。若容器内液体密度为 (kg/m^3) ,大气压力为 $P_b(Pa)$,则容器内气体的压力 P 为

$$P = P_b + gh \quad (1-1-1a)$$

或者

$$P - P_b = gh \quad (1-1-1b)$$

这里 P 称为绝对压力, gh 是绝对压力与大气压力之差,即气体相对于大气的压力,也叫相对压力。相对压力可以从表上直接得到,故又叫表压力,并用 P_a 表示。绝对压力和表压力的关系是

$$P = P_b + P_a \quad (1-1-2)$$

若规定,当绝对压力高于大气压力时,相对压力(表压力)为正,那么,绝对压力低于大气压力时,相对压力(表压力)就为负。

当表压力为负时,绝对压力 P 为

$$P = P_b - gh \quad (1-1-3)$$

这时,我们称 gh 为真空度。

例 1-1-1 某气体表压力为 $1000mmH_2O$,大气压力为 $760mmHg$,绝对压力为多少 Pa ?

解:由表 1-1-1 查得:

$$1000mmH_2O = 9807Pa$$

$$760mmHg = 101325Pa$$

由式(1-1-2)得:

$$P = P_b + P_a = 101325 + 9807 = 111132(Pa)$$

2. 静压、动压和全压

装在容器内的气体作用在容器壁的压力叫静压,用 P_{st} 表示,静压是单位体积气体所具有的内能。在隧道内以速度 $v(m/s)$ 流动的气体,除有内能外,还有对外做功的能力,即动能。单位体积气体所具有的动能就是气体的动压,用 P_d 表示。

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2} \quad (1-1-4)$$

式中: ρ ——气流的密度, kg/m^3 。

流动气体的静压与动压的代数和,称为气体的全压,用 P 表示。

$$P = P_{st} + P_d \quad (1-1-5)$$

隧道通风中气体压力的测量分静压、动压和全压,它们可以用仪器直接测量。测量的仪器为 U 型压差计和皮托管(如图 1-1-2),各种压力测定及其相互关系如图 1-1-3 所示。

图 1-1-1 “U”形压差计

图 1-1-2 皮托管的构造

图 1-1-3 各种压力测定及其相互关系

(a)测定布置及具体表示;(b)坐标表示;1~6-U型垂直水柱计;7-风筒;8-零压线;9-大气压线

二、温 度

温度是物体冷热程度的标志。根据分子运动理论,气体的温度是气体分子运动动能的度量。温度与气体分子运动动能之间的关系为

$$\frac{m}{2} v^2 = BT \quad (1-1-6)$$

式中： v ——分子平均运动的均方根速度；

B ——比例常数；

T ——绝对温度；

m ——分子的质量。

测量物体温度高低的标尺称温标,工程上常采用国际百度温标和绝对温标。国际百度温标又叫摄氏温标,用 t 表示。它规定在标准大气压(101325Pa)下,冰的熔点为 0°C , 水的沸点为 100°C 。绝对温标又称热力学温标,用 K 表示,它把分子运动速度为 0 时的温度定为 0K ,把纯水的三相点温度定为 273.16K ,它与国际百度温标的分度相同,用两种温标表示的温度之间的关系为:

$$t = T - 273.16 \quad (1-1-7)$$

式中： t ——国际百度温标表示的温度；

T ——热力学温标表示的温度。

气体热力计算一律采用绝对温标,国际单位制也规定用绝对温标。在式(1-1-5)中,为计算方便,工程上常取 273K 。

三、比容和密度

单位质量物质所占的容积称为比容,用 (m^3/kg) 表示。如质量为 $M(\text{kg})$ 的气体占有容积为 $V(\text{m}^3)$,则比容为:

$$= \frac{V}{M}$$

单位容积的物体所具有的质量称为密度,用 (kg/m^3) 表示,即

$$= \frac{M}{V}$$

比容 与密度 互成倒数,即

$$= \frac{1}{\rho} \text{ 或 } = \frac{1}{\gamma}$$

计算中还经常用容重 (N/m^3) ,它是单位容积物质所具有的重力:

$$= \frac{G}{V}, \text{N}/\text{m}^3$$

式中： G ——物体的重力, N , 因为

$$G = mg$$

故有

$$= \frac{G}{g} / V = \frac{G}{V} \frac{1}{g} = \frac{\gamma}{g}$$

或

$$= \frac{\gamma}{g} \quad (1-1-8)$$

气体的密度与气体的压力、温度和相对湿度等因素有关。在标准大气状态(温度为 273K ,绝对压力为 101325Pa ,重力加速度为 $9.807\text{m}/\text{s}^2$ 时干燥空气的状态)下,空气的密度为 $1.2931\text{kg}/\text{m}^3$ 。随着大气状态(温度、压力、相对湿度等)的变化,密度也发生变化。

在非标准状态下,空气的密度计算见本章第二节。

四、粘 性

流体的粘性指流体抗剪切的性质,用粘度(或称粘滞系数)表示,它的物理意义分析如下:

图 1-1-4 为某管道空气层流速分布图,由图可见,在管道不同位置,空气流速不同,说明空气具有抗剪切的能力(存在内摩擦力)。实验表明:流动空气所受内摩擦阻力 $F(N)$ 正比于空气间接触面积 $S(m^2)$ 和速度梯度 $\frac{du}{dy}(s^{-1})$, 即

$$F = \mu S \frac{du}{dy} \quad (1-1-9)$$

式中: μ ——比例系数,称为动力粘度(或绝对粘度),也叫粘滞系数(或内摩擦系数),单位 $Pa \cdot s$; 动力粘度 μ 与密度 ρ 的比值称运动粘度(或称运动粘性系数),用符号 ν 表示,其单位为 m^2/s 。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-1-10)$$

流体的粘度随温度而变化。气体的粘度随温度升高而增加,因为气体的分子间距大,其粘性主要起因于分子间的动量交换。温度高时动量交换增加,因而粘性增大。液体的粘性则随温度升高而减小,因为液体的分子间距小,其粘性主要起因于分子之间的引力。温度升高时分子间引力减小,因而粘性减小。表 1-1-2 为几种流体的粘度。图 1-1-5 为压力为 $101325Pa$ 时,不同温度下空气和水的运动粘度。

图 1-1-4 层流流速分布

图 1-1-5 空气与水的运动粘度

几种流体的粘度 ($t = 20^\circ C$, $P = 0.1MPa$)

表 1-1-2

流 体 名 称	动力粘度 $\mu(Pa \cdot s)$	运动粘度 (m^2/s)
空气	1.808×10^{-5}	1.501×10^{-5}
氮气(N_2)	1.76×10^{-5}	1.41×10^{-5}
氧气(O_2)	2.04×10^{-5}	1.43×10^{-5}
水	1.005×10^{-5}	1.007×10^{-5}

五、湿 度

(一)湿度的概念

空气的湿度是指空气的潮湿程度。有两种度量方法:绝对湿度和相对湿度。

1. 绝对湿度,指单位体积空气中所含水蒸汽的质量,用 ρ_v 表示。单位与密度单位相同,数值等于水蒸汽在其分压下的密度。

在给定温度下,单位体积空气所能容纳的水蒸汽分子是有限的。把含有最大限度水蒸汽量的空气叫做饱和空气,单位体积饱和空气中所含水蒸汽量,叫饱和湿度,用 ρ_{sat} 表示。此时

水蒸汽的分压力叫做饱和水蒸汽压力,用 P_{sat} 表示。空气的饱和湿度随温度的增加而增加。不同温度下空气的饱和湿度见表 1-1-3,因此对于绝对湿度相同的空气,在低温下表现潮湿,在高温下则表现干燥。由于绝对湿度不能反映这一事实,因此不能真正表示空气的潮湿程度。

饱和水蒸汽表

表 1-1-3

$t(^\circ\text{C})$	ρ_{sat} (kg/m^3)	P_{sat} (mmHg)	$t(^\circ\text{C})$	ρ_{sat} (kg/m^3)	P_{sat} (mmHg)
-20	0.0011	0.96	14	0.0120	11.99
-15	0.0016	1.45	15	0.0128	12.79
-10	0.0023	2.16	16	0.0136	13.64
-5	0.0034	3.17	17	0.0144	14.50
0	0.0049	4.58	18	0.0153	15.50
1	0.0052	4.92	19	0.0162	16.50
2	0.0056	5.29	20	0.0172	17.50
3	0.0060	5.68	21	0.0182	18.70
4	0.0064	6.09	22	0.0193	19.80
5	0.0068	6.53	23	0.0204	21.10
6	0.0073	7.00	24	0.0216	22.40
7	0.0077	7.49	25	0.0229	23.80
8	0.0083	8.02	26	0.0242	25.20
9	0.0088	8.58	27	0.0256	26.70
10	0.0094	9.21	28	0.0270	28.40
11	0.0099	9.84	29	0.0285	30.10
12	0.0100	10.52	30	0.0301	31.80
13	0.0113	11.23	31	0.0318	33.70

2. 相对湿度,是绝对湿度与同温度下饱和湿度之比,用符号 ϕ 表示:

$$\phi = \frac{\rho}{\rho_{\text{sat}}} \quad (1-1-11)$$

相对湿度也叫饱和度,它反映了空气中所含水蒸汽量接近饱和的程度。 ϕ 值小,空气干燥,吸水能力强, $\phi = 0$ 为干空气; ϕ 值大,空气潮湿,吸水的能力弱, $\phi = 1$ 为饱和空气。

例 1-1-2 已知甲地点气温为 18°C ,绝对湿度为 $0.0107\text{kg}/\text{m}^3$,乙地点气温为 30°C ,绝对湿度为 $0.0153\text{kg}/\text{m}^3$,试求两地点的相对湿度,并指出何者吸湿能力强。

解:由表 1-1-3 查得 18°C 时饱和湿度为 0.0153 ,故甲地的相对湿度为

$$\phi = \frac{0.0107}{0.0153} = 0.7 \text{ 或 } 70\%$$

而 30°C 时之饱和湿度为 0.0301 ,故乙地点的相对湿度为

$$\phi = \frac{0.0153}{0.0301} = 0.51 \text{ 或 } 51\%$$

根据相对湿度值可知,乙地点的绝对湿度虽大于甲地点,但相对湿度较小,故其吸湿能力比甲地点强。

图 1-1-6 干-湿球温度计

(二)空气湿度的测量