

长大隧道施工 通风技术研究与实践

陈寿根 张 恒 编著

CHANGDA SUIDAO SHIGONG
TONGFENG JISHU YANJIU YU SHIJIAN



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

中央高校基本科研业务费专项资金资助 (SWJTU11ZT33)

教育部创新团队发展计划资助 (IRT0955)

长大隧道施工 通风技术研究与实践

陈寿根 张 恒 编著

CHANGDA SUIDAO SHIGONG
TONGFENG JISHU YANJIU YU SHIJIAN

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容提要

本书结合锦屏二级电站辅助洞、锦屏二级电站引水隧洞、贵广铁路油竹山隧道和斗篷山隧道等长大隧道施工为背景,开展了长大隧道施工通风技术研究,并在研究成果的应用中不断总结经验、提高技术水平,形成了一整套长大隧道施工通风技术,可为类似工程施工通风提供宝贵的经验和参考。

本书共分六章,主要内容包括隧道施工通风的基本理论、通风设计、壁面粗糙度影响、通风数值模拟技术和工程实例等。本书可为从事隧道及地下工程设计、施工、建设管理的科技人员使用,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

长大隧道施工通风技术研究与实践 / 陈寿根, 张恒
编著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2014.5
ISBN 978-7-5643-2713-2

I. ①长… II. ①陈… ②张… III. ①特长隧道 - 隧道施工 - 隧道通风 - 研究 IV. ①U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 238404 号

长大隧道施工通风技术研究与实践

陈寿根 张 恒 编著

*

责任编辑 杨 勇

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

四川省成都市金牛区交大路 146 号 邮政编码: 610031

发行部电话: 028-87600564

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 170 mm × 240 mm 印张: 14.25

字数: 247 千字

2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-2713-2

定价: 56.00 元

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



序

随着我国在铁路、公路、水利等基础建设中修筑隧道的数量和长度日益增加，在以钻爆法施工和无轨运输为主导的大环境下，长大隧道内的施工通风日益困难，施工通风问题已经成为隧道快速施工的“瓶颈”。不论是从施工安全的角度，还是从施工进度及施工经济的角度来看，长大隧道独头掘进施工中的通风散烟等都是摆在工程设计人员、施工人员和管理人员面前亟待解决的重要问题。

《长大隧道施工通风技术研究与实践》一书比较全面、透彻地阐述了隧道施工通风的基本理论、隧道施工通风的方式及设备选型、隧道壁面粗糙度对通风的影响、隧洞施工通风的流体力学仿真及工程实例，研究和总结了长大隧道施工通风技术。该书理论紧密联系实际，图文并茂，深入浅出，突出工程实用性，可参考性强。本书的出版将极大地丰富和完善我国在各种复杂条件下的隧道施工通风技术，为我国今后各种地下工程建设可提供非常有价值的参考和借鉴。

相信读者能从本书中得到启发，本书的出版、发行可为提高和完善长大隧道施工通风技术做出贡献！

西南交通大学教授 麦佃曾

2013年7月

前 言

随着隧道施工技术水平的不断提高,修建隧道的长度越来越长,规模越来越大,隧道施工通风从初期的利用自然条件进行通风逐步发展到借助通风管路和施工巷道进行通风,通风设备逐步大型化。通风防尘是涉及人员生命健康的大事,是隧道施工水平的重要标志,也是影响隧道施工方案选取的控制因素之一。尤其在长大隧道施工中,洞内通风和空气净化问题更为突出。在隧道和地下工程的施工过程中,施工通风是隧道内外空气交换的唯一手段,是隧道施工人员及作业机械的“生命线”,是不可缺少的技术环节。特别是对于有瓦斯、高温、有毒气体等特殊危险的隧道,必须保证充足的通风量,降低洞内有害物质的浓度,避免瓦斯爆炸、高温、毒害等灾害的发生。

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,而且是降温、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,作为隧道施工环境综合控制的主要组成部分。施工通风效果的好坏,直接关系到隧道内作业人员的健康和施工效率、工程进度与施工安全。

从隧道的发展趋势看,实现工程全局的高速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,特别是在机械化施工水平高度发展的今天,长距离施工通风的水平和发展不仅对隧道建设工期,而且对线路勘测、选线、工程设计、施工分段及方案的确定、施工机械设备的选择以及工程进度、工程投资等都有重要影响,因此研究特长隧道的施工通风技术是非常必要的。

本书以锦屏二级电站辅助洞、锦屏二级电站引水隧洞、贵广铁路油竹

山隧道及贵广铁路斗篷山隧道等长隧道施工为依托,通过综合采用技术调研、工程类比、理论分析和数值模拟、现场测试和现场试验、归纳总结等研究手段,针对长大隧道施工通风难题进行了深入研究,取得了“壁面粗糙度对通风效果的影响、隧洞施工通风的计算流体动力学分析技术、压入式通风辅以支洞射流通风技术、巷道式联合通风技术、空气除尘净化技术、通风效果现场测试技术”等一系列研究成果。这些技术成果的研究成功及在施工中的应用确保了工程安全、优质、按期完成。同时,为特长隧洞施工通风开辟了新的技术途径,也为我国其他类似地下工程提供了可供参考和借鉴的成功范例。完善和优化了施工通风设计,总结和提炼出一整套无轨运输条件下特长隧洞施工通风技术,推动了我国施工通风技术的发展。

笔者研究过程中,得到了中铁二局集团有限公司的大力支持,特别是杨家松教授级高级工程师,马辉教授级高级工程师,刘仁志教授级高级工程师,辜文凯教授级高级工程师等专家的具体指导和帮助。在现场调研、理论分析、试验和技术总结过程中,得到了中铁二局集团公司、中铁二局二公司等单位和同仁的大力支持和帮助,在此对他们表示衷心的感谢。

本书系我们初次的大胆尝试,由于水平有限,难免有错误和不足之处,恳请专家及同行批评指正,也热诚欢迎读者提出宝贵的意见。

编著者

2013年6月于成都

目 录

第 1 章 隧道施工通风的基本理论	1
1.1 隧道施工通风发展概述	1
1.1.1 压入式通风研究现状	1
1.1.2 巷道式通风研究现状	3
1.1.3 隧洞施工通风的计算机仿真技术的研究现状	8
1.2 长大隧道的划分	11
1.2.1 隧道长度划分标准	11
1.2.2 隧道断面划分标准	12
1.3 隧道内的主要污染源	12
1.3.1 有害气体的性状与危害	12
1.3.2 可燃性气体与缺氧空气	13
1.3.3 粉 尘	14
1.3.4 其他有害因素	15
1.4 隧道施工的空气质量要求	15
1.4.1 现行《铁路隧道施工规范》规定的卫生标准	15
1.4.2 现行《公路隧道施工技术规范》规定的卫生标准	15
1.4.3 现行《煤矿安全规程》规定的卫生标准	16
1.4.4 现行《金属非金属矿山安全规程》规定的卫生标准	16
1.4.5 现行《冶金地下矿山安全规程》规定的卫生标准	17
1.5 隧道内空气流动的运动状态	19
1.5.1 流体运动两大类型	19
1.5.2 黏性流体两种流动状态	20

第 2 章 隧道施工通风方式及设备选型	23
2.1 隧道施工通风方式	23
2.1.1 自然通风	23
2.1.2 压入式通风	23
2.1.3 抽出式通风	24
2.1.4 混合式通风	25
2.1.5 巷道式通风	27
2.1.6 不同通风方式特点对比分析	28
2.2 隧道施工通风设备选择	29
2.2.1 通风机选型	29
2.2.2 通风管选型	30
第 3 章 隧洞壁面粗糙度对通风的影响研究	32
3.1 壁面粗糙度对流体流动的影响	32
3.1.1 湍流黏性底层	32
3.1.2 壁面粗糙对流动的影响、湍流分区	36
3.2 FLUNET 壁面边界条件的定义	37
3.2.1 加入粗糙度修正的壁面律	37
3.2.2 设置粗糙度参数	38
3.3 典型粗糙壁面模型	39
3.3.1 粗糙单元模型	39
3.3.2 粗糙单元形状对流体流通影响	41
3.3.3 粗糙单元高度对流体流通影响	44
3.3.4 粗糙单元间距对流体流通影响	47
3.3.5 同一粗糙条件下断面直径的影响	49
3.4 壁面平均粗糙高度的定义	50
3.5 壁面粗糙常数的取值研究	52
3.5.1 粗糙常数的计算方法	52
3.5.2 粗糙常数计算的模型分解法	55
3.5.3 粗糙常数计算的主要粗糙度法	59

第 4 章 隧洞施工通风的流体力学仿真研究	61
4.1 数值计算模型及边界条件确定	61
4.1.1 数值计算模型和方法	61
4.1.2 边界条件确定及基本假设	65
4.1.3 数值计算相关计算参数	66
4.2 锦屏引水隧洞壁面粗糙度取值	68
4.2.1 壁面粗糙高度取值	68
4.2.2 壁面粗糙常数取值	72
4.3 隧洞施工通风数值模拟	74
4.3.1 联合巷道式施工通风系统仿真	74
4.3.2 横通道及附近射流风机布置的三维仿真	80
4.3.3 轴流风管距掌子面距离的三维仿真	84
4.3.4 通风分流数值模拟研究	91
4.3.5 通风换向数值模拟研究	95
第 5 章 长大隧道施工通风工程实例	99
5.1 锦屏水电站锦屏山隧洞施工通风	99
5.1.1 工程概况	99
5.1.2 施工通风方案	100
5.1.3 射流风机通风原理及计算	100
5.1.4 施工通风设计计算	105
5.1.5 射流风机选型与布置	111
5.2 锦屏水电站引水隧洞群施工通风	114
5.2.1 工程概况	114
5.2.2 施工通风方案	118
5.2.3 压入式辅以支洞射流通风技术研究	119
5.2.4 巷道式联合通风应用	129
5.2.5 通风效果现场测试	144
5.3 贵广铁路油竹山隧洞施工通风	163
5.3.1 工程概况	163
5.3.2 施工通风设计	163

5.3.3	施工通风方案优化	166
5.3.4	风量计算	171
5.3.5	粉尘和有害气体现场测试分析	172
5.3.6	空气除尘净化技术	174
5.4	贵广铁路斗篷山隧道施工通风	187
5.4.1	工程概况	187
5.4.2	施工通风设计计算	187
5.4.3	施工通风数值计算分析	193
5.4.4	通风设备的选择	199
5.4.5	通风管理	202
第 6 章	经验总结	204
参考文献		207

第 1 章 隧道施工通风的基本理论

1.1 隧道施工通风发展概述

1.1.1 压入式通风研究现状

压入式通风是一种地下洞室的机械通风方式,它是利用设置在洞外的通风机械通过通风管道将新鲜空气送至工作面,以供给洞内足够的新鲜空气,污浊空气通过隧道流出,稀释、排除有害气体和降低粉尘浓度,从而达到改善劳动条件、保障作业人员身体健康的目的^[1-11]。

两河口水电站位于四川省甘孜州雅江县境内的雅砻江干流上,距雅江县城上游约 25 km,为雅砻江中下游梯级电站的控制性水库电站工程。两河口隧道施工通风分为两阶段,第一阶段采用洞口压入式通风方式,第二阶段采用压入接力式通风方式。隧道开挖完成 2 350 m 前采用在洞口压入式通风,即洞口设置咸阳西安交大风机厂 SD17Y-II No12.5A 型通风机(功率为 2×115 kW,流量为 $1\,500 \sim 2\,250$ m³/min,风压为 $2\,650 \sim 6\,000$ Pa),配 1.5 m 软风管向洞内压风,通风系统布置见图 1.1。合同段开挖超过 2 350 m 后,通风效果逐渐变差,由于洞内的内燃机械较多,内燃机尾气烟尘较大,洞内能见度较低,出渣过程分 2~3 次进行,导致隧道出渣时间由原来的 3~4 h 增加到 9~10 h。洞身开挖 2 350 m 以后,采用压入接力式通风,在洞口安设 1 台 SD17Y-III No12.5A (2×115 kW) 的轴流通风机,配备 1.5 m 软风管向洞内压风,在距洞口约 1 700 m 处安设 1 台 SD17Y-III 11.0 型通风机(咸阳西安交大风机厂,功率为 2×55 kW,流量为 $866 \sim 1\,200$ m³/min,风压为 $960 \sim 3\,700$ Pa),配备 1.5 m 软风管向洞内压风^[12],通风系统布置见图 1.2。

太行山隧道 1[#]、2[#]斜井及其正洞段工程采用无轨运输和内燃机械作业的长大隧道独头压入式通风技术。通过理论通风量的计算及现场实际情况,提出变更加大斜井断面尺寸和采用 1.6 m 的柔性风管,配用两台 SDF(C)-N013 隧道施工专用轴流通风机。最大配用电机功率为低速 22×2 kW,中速 45×2 kW,

高速 $132 \times 2 \text{ kW}$ ，拥有 6 个挡位的通风量，可以随隧道掘进长度的增加逐步加大通风量，以达到节能目的^[13]。

杨家坝隧道全长 3 724 m，施工方案为：由进口和横洞 2 个工作面掘进，全部采用钻爆法施工，无轨运输方式出渣。总体通风设计方案确定采用压入式通风，进口和横洞掘进工作面均为压入式通风，在距洞口外 20 m 外设通风机，通过 $\Phi 1.5 \text{ m}$ 的 PVC 风管将新鲜的空气送至工作面，混浊空气沿洞身排出洞外。风管安设在起拱线处，方便修补拆卸。在衬砌台车位置，风管放在上部横梁上^[14]。

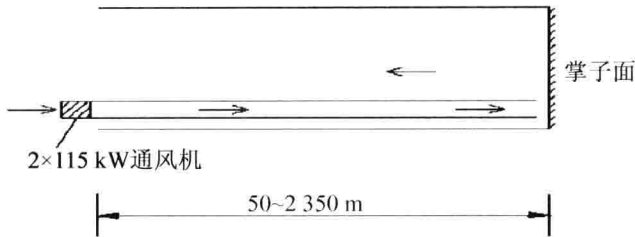


图 1.1 两河口隧道第一阶段通风系统布置图

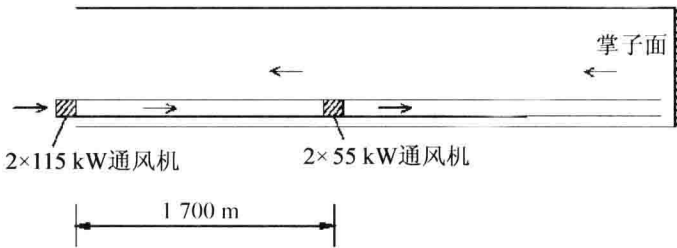


图 1.2 两河口隧道第二阶段通风系统布置图

赣龙铁路金华山隧道全长 5 146 m，分进、出口、斜井掘进，采用新奥法无轨运渣施工方案。隧道采用了独头压入式通风技术。选用轴流式通风。风管选用 $\Phi 1.6 \text{ m}$ 柔性风管，主要为聚酯塑胶复合而成的高强度帆布^[15]。

德国铁路新干线双线铁路隧道，掘进断面为 $100 \sim 140 \text{ m}^2$ ，首先先开挖拱部断面，之后则以一定的距离开挖台级和隧底，采用双软管压入式通风方式，软管直径为中 $1.8 \sim 2.5 \text{ m}$ ，洞口通风机的功率为 500 kW ，实现独头通风 $3\,400 \text{ m}^3$ ^[16]。

穿越阿尔卑斯山连接法、意两国的弗雷瑞斯公路隧道，开挖断面 66.25 m^2 ，采用双管道压抽混合式通风方式，软管直径中 1.9 m ，洞口压入式风机供风量 $9\,600 \text{ m}^3/\text{min}$ ，实现独头通风 $6\,400 \text{ m}^3$ ^[17]。

1.1.2 巷道式通风研究现状

早期的隧道施工期间的巷道式通风仍局限于传统的矿山巷道式通风,多设置风门以实现洞内外空气交换,其具体的方法为:在平导(或隧道)洞口设一风门,在平导(或隧道)外侧通过另设风道来安设大功率主扇,再通过设在平导(或隧道)和横通道内安设局扇来向各工作面送风。京广铁路复线大瑶山隧道、南昆铁路米花岭隧道、侯月线云台山隧道等长大隧道中均使用这种方法。大瑶山隧道进口平导的通风方式为:在平导外侧架设 460 kW 轴流风机 1 台^[18],平导洞口设风门,在临近掌子面的平导内设置局扇,经横通道把新鲜风流送入隧道正洞工作面,其通风示意图如图 1.3 所示。此通风方式的缺点是除了正洞长期处于污风之中外,还有应用大功率主扇耗电量非常大,风门漏风和横通道封闭不严使部分风流短路,效果不甚理想并浪费的能量过多。

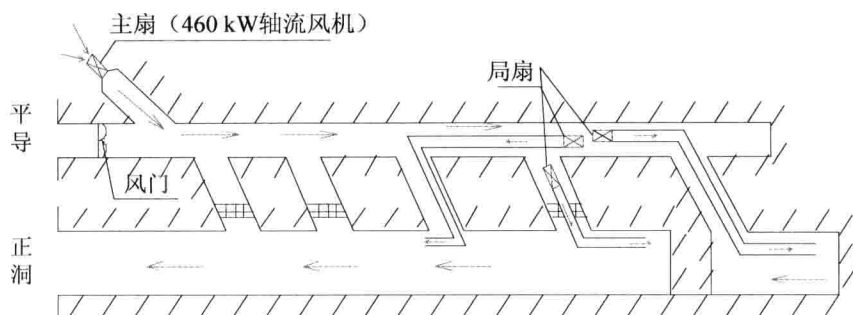


图 1.3 大瑶山隧道施工通风示意图

无风门射流通风是公路隧道运营通风的显著特点,在隧道施工通风中极少运用,国外也很少有这方面的研究。广渝(广安—重庆)高速公路华莹山隧道首次成功地将公路隧道运营通风的射流通风理念引入到隧道施工通风中。华莹山隧道为双洞单向行车的特长直线人字坡隧道,左、右隧道全长 9 412 m(左、右隧等长)。钻爆法全断面开挖,断面面积Ⅳ、Ⅴ类围岩约 85 m²,Ⅱ、Ⅲ类围岩最大达 130.5 m²。装载机装渣,无轨运出渣。施工通风面临的主要问题:一是全断面开挖揭煤时的高压、高浓度的瓦斯;二是无轨运输车辆废气。通风整体采用独头压入式通风方案,局部采用射流风机产生的风速加大横通道以后的风速。隧道独头施工通风西口最大距离为 2 200 m,东口为 2 800 m,取得了长大公路瓦斯隧道施工通风的好成绩^[19]。自此,巷道式通风由传统的矿山巷道通风发展到了新型的无风门巷道式射流通风。该通风方式通过引入射流风机,摒弃了传统的采用大功率主扇向洞内输送新鲜

空气的通风方式，利用先进的射流技术推动洞内外空气的交换，在有平导的长大隧道及双条特长隧道施工中，把洞口到射流风机的区段变为真正意义上的巷道式通风（进风道为新鲜风流），在射流风机到掘进面之间实现单一的压入式通风（轴流风机置于新鲜风带中）。该通风方式充分发挥了巷道式通风的优势，具有通风效果好、能耗低、现场操作简单、可靠性高等优势。

摩天岭隧道位于杭州至兰州高速公路巫山至奉节段，全长 7 353 m，隧道出口位于奉节县草堂镇桂兴村四组，设计为双向四车道分离式隧道，每间隔 400 m 左右设置人行通道或车行通道。隧道最大断面 95 m²，上坡道坡度为 1.85%。采用钻爆法全断面开挖，独头掘进 3 600 m，装载机装砟，无轨运输出砟。施工通风需解决的问题：一是毒害气体，主要来源于爆破炮烟，无轨运输车辆柴油机废气；二是粉尘，主要来源于岩尘、炮烟、水泥尘、烟尘等。施工通风方案分为两个阶段：第一阶段为压入式通风：采用两台 DKS-NO11 轴流式通风机位于洞口向隧道开挖面直接送风，通风效果随距离的增加逐步降低，压入式通风距离一般可达到 1 500 ~ 1 800 m。若换了更大功率的轴流通风机，则可加长通风距离，如图 1.4 所示。第二阶段为巷道式通风：采用两台 QSF-1250 强力射流风机（后期增加为三台）在隧道出口右线洞内 300 m 处向洞内送风，两台 DKS-NO11 轴流式通风机位于右线车行通道后 40 m 处分别向隧道开挖面直接送风（左线通风管需穿过车行通道向左线开挖面供风），轴流风机后的通道都必须封死，轴流风机前的通道设 30 kW 射流风机从右线向左线通风，如图 1.5 所示^[20]。

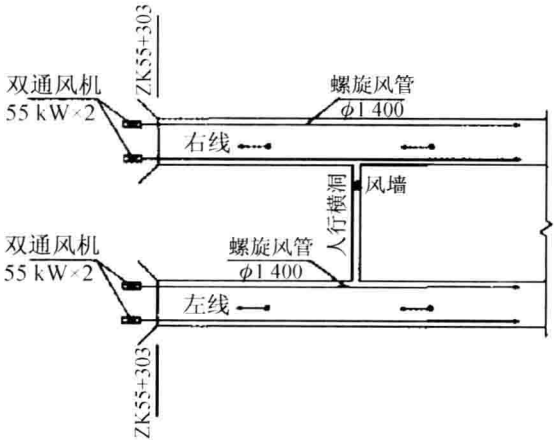


图 1.4 摩天岭隧道第一阶段施工通风示意图

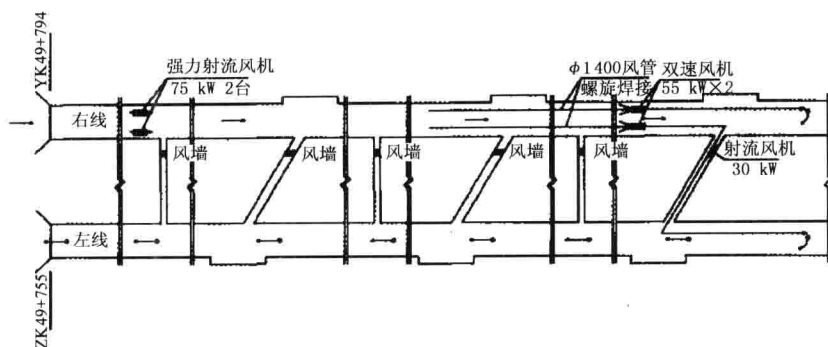


图 1.5 摩天岭隧道第二阶段施工通风示意图

渝怀线圆梁山隧道位于重庆市酉阳县境内，隧道进口端在细砂乡，出口端在泉孔乡，全长 11 068 m (DK351+465 ~ DK362+533)，隧道进出口施工分界里程为 DK355+820。隧道右侧 30 m 处设置平导，全长 11 186 m (PDK351+388 ~ PDK362+574)，隧道正洞与平导之间设置 26 个横通道，其中顺通 18 个，反通道 8 个。双线隧道普通开挖断面 123 m^2 ，单线隧道普通开挖断面 56 m^2 ，单线隧道溶洞段开挖断面 106 m^2 。采用钻爆法施工，装载机装砬，有轨运输出砬。该隧道为特长瓦斯隧道，需要攻克施工中长距离送风以及过煤层瓦斯和天然气段时的通风难题。经过论证，放弃原设计的主扇通风方案，而采用了射流通风方案。进出口工区通风布置均分为四个阶段：第一阶段，当正洞和平导之间的横通道连通前，进出口工区的正洞和平导各自采用独立的管道压入式通风。第二阶段，当横通道连通正洞和平导构成通风回路时，则采用射流通风，新风从平导口进入，污风从正洞口排出，各掌子面则采用管道压入式通风，如图 1.6 所示。当平导揭煤时，则从正洞分风加大平导工作面的风量。第三阶段，通风方式与第二阶段基本相同；但随着隧道的向前掘进，需不断增加射流风机数量，如图 1.7 所示。当正洞揭煤，应加大该整洞工作面的风量，其他工作面可暂停掘进。第四阶段，通风方式与第二阶段基本相同^[21]。

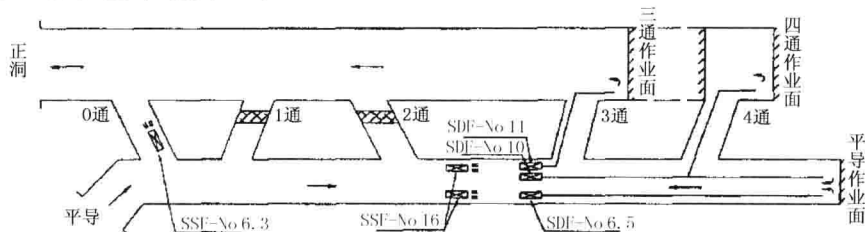


图 1.6 圆梁山隧道进口工区第二阶段施工通风布置示意图

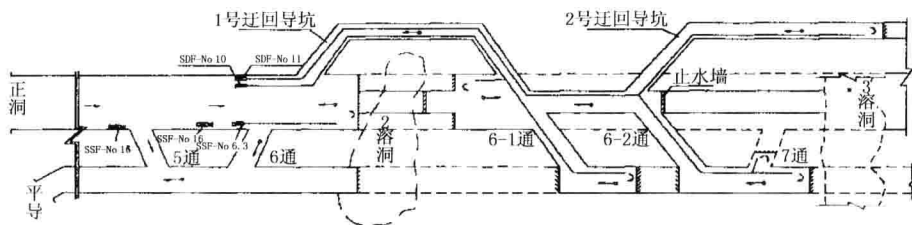


图 1.7 圆梁山隧道进口工区第三阶段施工通风布置示意图

秦岭特长隧道是目前我国第二长的铁路隧道，设计为两座基本平行的单线隧道，线间距 30 m，最大埋深 1 600 m。Ⅰ线隧道长 18 459 m，以 TBM 法施工为主（掘进机施工），断面为 $\Phi 8.8$ m 圆形；Ⅱ线隧道长 18 456 m，采用钻爆法施工，两隧道之间每隔 420 m 设有横通道。先期在Ⅱ线隧道中线位置采用钻爆法开挖面积约 26 m^2 的导洞（简称“Ⅱ线平导”），待Ⅰ线隧道建成后，再将平导扩大成Ⅱ线隧道。秦岭隧道Ⅱ线平导在有轨运输条件下，采用柔性风管压入式通风，具体实施过程中，在 6 300 m 处开设通风斜井，利用辅助坑道进行巷道式通风，使施工独头掘进达到了 9 050 m^[22]。

锦屏辅助洞位于拟建锦屏二级水电站引水隧洞轴线南侧，为上、下行分离式双洞隧道（A、B 线），两条隧道的中间相隔约 35 m。每隔 500 ~ 800 m 设置一个连接通道，单洞全长约 17.5 km，是整个锦屏水电枢纽前期的控制性工程。锦屏辅助洞的最大埋深为 2 375 m，埋深超过 1 500 m 的洞段埋深占隧道总长的 73%，无条件在隧道中间合理地设置竖井或斜井等辅助坑道，仅能从正东西向的两个工作面相向掘进，其中隧洞西端的独头掘进超过 9 500 m，为国内钻爆法施工、无轨运输的独头距离最长的隧道。为在无轨运输的情况下确保施工快速进行，将公路运营通风理念引入到施工通风中，摒弃了传统的采用大功率主扇向洞内输送新鲜空气的通风方式，提出了无风门巷道式射流通风与传统轴流通风相结合的混合式通风方案。在隧道洞挖 2 300 m 前采用传统的压入式通风，而在洞挖 2 300 m 后采用了巷道式和压入式混合的一种通风方式，见图 1.8。其做法是利用 A、B 线两条隧道和一个横通道（通常为最靠近掌子面的那一个）作为风管，而将其他已开挖的横通道处设封堵防止中途漏风，使之形成循环风流，并在最前端的横通道附近设置轴流风机，采用风管通风解决掌子面的通风问题。成功地解决了无轨运输条件下特长隧道超长距离独头掘进施工通风技术难题，确保了工程快速、安全地进行^[23-31]。国内长大隧道施工通风对照如表 1.1 所示。

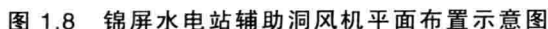


表 1.1 长大隧道施工通风对照表

这些成果反映了国内隧道施工通风技术的发展水平。但是对于设有平行导坑等辅助坑道的隧道,或者具有上下行的平行两隧道,施工中需要的通风量大,工作面多,通风网络复杂,采用现有的通风布置,难以达到令人满意