

高寒高海拔长隧道通风排烟方案优选

翟为勃¹ 朱伟玺^{2,3*} 王道明^{2,3} 朱鑫杰^{2,3}

1. 中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 710000
2. 华能澜沧江水电股份有限公司 云南 昆明 650200
3. 华能澜沧江上游水电有限公司 西藏 昌都 854001

摘要:在高寒高海拔长隧道施工中,复杂的气候与地质条件给施工带来诸多挑战,科学合理地选定通风排烟方案,是确保施工安全、提升施工效率的重中之重。本文围绕机械通风与集中排烟系统、自然通风与局部排烟结合系统、智能通风与智能排烟综合系统这三种方案,从技术指标、环境适应性、经济性等多个维度展开详细比选。借助实际案例分析,对各方案在高寒高海拔环境下的应用成效进行深入剖析,旨在为隧道建设提供更为科学的决策支撑,进而推动通风排烟设计的持续优化。

关键词:高寒高海拔;长隧道;通风排烟;方案比选;智能系统

引言

高寒高海拔地区,以其独特的气候特征(诸如低温、缺氧、昼夜温差显著)及复杂多变的地质条件(例如冻土层广泛分布、软弱围岩频繁出现),给长隧道施工带来了前所未有的严峻挑战。目前,国内外针对该类特殊环境下的通风排烟技术虽有一定研究,但系统性的方案比选仍需深化。本文通过多方案对比与案例分析,旨在为工程实践提供理论支撑与技术参考。

1 高寒高海拔长隧道环境特征分析

1.1 气候条件

高寒高海拔长隧道区域通常位于气候极端地带,具有显著的高寒特征。低温持续期长:冬季平均气温低至-10℃,极端时更可降至-15℃以下,伴有持续降雪及冰冻。昼夜温差显著,夏季日照强烈,日温差常超15℃。高海拔地区气压低、氧气稀薄,空气湿度相对较低,导致蒸发作用强烈,气候干燥^[1]。这些气候条件对隧道施工材料的选择、设备的运行效率及施工人员的身体健康均构成严峻挑战。

1.2 施工环境

在高寒和高海拔的长隧道施工环境中,恶劣条件主要体现在以下几个方面:首先,交通不便导致材料运输困难,特别是在冬季大雪封山的情况下,物资供应可能会遭遇中断;其次,施工场地受地形地貌限制,设备布置及作业面展开均受影响;再次,电力供应不稳定,高海拔地区电网覆盖不足,加之大风、暴雪等恶劣天气,易致停电事故;此外,施工人员在高寒缺氧的环境下生活条件艰苦,这对工人的健康和劳动效率产生负面影响;最后,环境保护要求严格,施工活动必须严格遵守

环保法规,以防止对脆弱的高寒生态系统造成破坏^[2]。

2 高寒高海拔长隧道通风排烟技术

2.1 通风方式的选择与优化

在高寒高海拔长隧道的施工过程中,鉴于本工程单工作面长距离掘进的特点,选择机械压入通风方式作为主要通风手段显得尤为重要。该通风系统利用隧道洞外的空气压缩机,强制将新鲜空气送入隧道,形成一股正向气流,有效清除作业区域的有害气体和烟尘。机械压入通风的优势在于其能够提供稳定且强大的风量,确保隧道深处也能获得良好的空气质量,这对于保障施工人员的健康和提高作业效率至关重要。针对高寒高海拔地区的特殊气候,选择通风设备时需着重考虑其耐低温性能和运行的稳定性。应选用能在极端低温条件下持续稳定工作的压缩机和风机,同时,风管设计需采取防冻措施,避免结冰影响通风效率^[3]。随着隧道的掘进,通风距离会不断增加,为了确保隧道深处的通风效果,通风系统需根据掘进进度适时调整和优化。这包括增加通风机的数量、调整风管的布局以及优化通风参数等,以确保整个施工过程中通风系统的有效性和经济性。在通风洞贯通后,为了进一步辅助通风排烟,可以在通风洞内布置射流风机,射流风机通过产生高速气流,增强隧道内的空气流动,有效加速烟雾和有害气体的排出。射流风机的布置位置和数量应根据隧道的实际情况进行科学规划,以达到最佳的通风效果。

2.2 排烟与空气净化技术的应用

除了基本的通风措施外,针对高寒高海拔长隧道施工中的排烟问题,还需配备专门的排烟与空气净化设备。特别是在爆破作业完成后,隧道内部会迅速充满烟

尘及有害气体，严重威胁施工人员的身体健康，并阻碍后续施工流程的顺利进行。因此，可以配备高原型除尘净化设备^[4]。这种设备专为高原环境设计，能够快速吸收粉尘，并集成滤芯自动脉冲喷吹清洗技术，实现自动集中排放粉尘的功能。此设备专为快速清除掌子面爆破遗留的粉尘而设计，有效缩短爆破后的等待时间，同时净化隧道空气，提升整体施工环境质量。应用高原型除尘净化设备，不仅能有效保障施工人员的健康安全，还能显著提升施工效率，大幅减少因空气质量问题引发的停工现象。同时，该设备的智能化和自动化程度较高，能够减轻施工人员的劳动强度，提高整体施工管理水平^[5]。

3 高寒高海拔长隧道通风排烟方案比选

3.1 方案设定

在高寒高海拔长隧道建设中，通风排烟方案的选择极为关键，关乎施工安全、效率及运营阶段的通风质量。针对该地区独特气候与地质特征，我们设定了三种方案。方案一，机械通风与集中排烟系统，采用大型轴流风机送风，风管输送新鲜空气至作业面，集中排烟口迅速排出有害气体，效率高但成本高昂，且需稳定电力供应。方案二，自然通风与局部排烟结合，利用隧道内外自然压差通风，节能环保，适合短距离或低强度作业，但在长隧道中难以满足全面通风需求。方案三，智能通风与智能排烟综合系统，集成传感器、自动化控制及物联网技术，实时监测空气质量、温度、湿度等参数，自动调节通风排烟设备状态，兼具高效与灵活性，但技术复杂度高^[6]。三种方案各有千秋，机械通风高效但成本高，自然通风节能环保但效力有限，智能通风则融合了高效与智能调节的优势，为长隧道通风排烟提供了创新思路。

3.2 技术指标评估

基于实测数据，机械通风与集中排烟系统在西汉高速秦岭隧道中展现高效通风，迅速降低CO和烟雾浓度，保障行车安全。自然通风与局部排烟系统依赖自然条件，适用于短距离或低强度作业，通风效率受环境影响。智能通风与智能排烟系统则介于两者之间，灵活高效，能智能调节通风效率，排烟效果最佳。机械通风系统设备成熟可靠，但需定期维护；自然通风系统设备简单，维护成本低，但易受自然条件影响；智能通风系统设备先进，技术复杂，维护要求高^[7]。自动化程度上，机械通风系统较低，依赖人工操作；自然通风系统最低，依赖自然条件；智能通风系统最高，实现远程监控和智能调节。三种方案各有特点，适用于不同场景。

3.3 环境适应性分析

高寒高海拔地区气候极端，对通风排烟系统提出特殊要求。机械通风系统需耐低温，防止设备故障；自然通风系统受气候影响大，冬季效果差；智能通风系统需适应极端气候，确保稳定运行^[8]。地质复杂，机械通风系统需考虑隧道空间布局，避免与围岩干涉；自然通风系统受地质影响小；智能通风系统需优化传感器布局，确保数据准确。环保方面，机械通风系统需降噪减振；自然通风系统环保最佳，但需关注局部设备对空气质量的影响；智能通风系统通过优化策略减少能耗和排放，符合环保要求。各系统需根据高寒高海拔地区的特殊条件进行适应性设计^[9]。

3.4 经济性分析

通风排烟系统经济性各异。机械通风系统初期投资最大，包含风机、风管等设备费用；自然通风系统初期投资小，主要涉及局部排烟设备；智能通风系统初期投资介于两者之间，涵盖传感器、控制器等智能组件。运行成本方面，机械通风系统最高，主要由电力和维护费用构成；自然通风系统最低，主要涉及局部设备维护；智能通风系统运行成本适中，通过智能调节降低能耗，但维护成本高。从经济效益看，机械通风系统能迅速优化空气质量，提速施工；自然通风系统虽节能但效能受限；智能通风系统长期节能高效，经济效益显著^[10]。

4 案例分析

4.1 具体高寒地区长隧道项目概况

本次案例聚焦青藏高原某片区一组高寒交通隧道工程，该工程包含多条关键隧道，每条隧道长约1.8公里，总长达到5公里。尽管隧道的最高海拔未超过2840米，但该地区的高寒环境带来了极端气候的挑战。根据相关研究，高海拔和严寒气候对隧道施工的影响显著，例如围岩冻融圈的范围和温度场分布规律，以及施工人员健康和设备性能的影响。此外，长期气象监测显示，气象条件对隧道通风系统有重要影响。该区域冬季漫长酷寒，据监测，历年最低温多在-17℃至-19℃间，低温持续久、昼夜温差大，且大风裹雪频发，施工环境恶劣^[11]。地质上，冻土层广布，冻融循环易致地基失稳；软弱围岩与断层破碎带交织，开挖时塌方、涌水风险高。二者叠加，施工难度与风险陡增。项目以破除自然阻碍为目标，通过研发低温材料、优化智能温控、搭建地质监测网等，保障施工安全与进度；同时设计复合通风方案，兼顾运营与应急，致力打造高海拔交通基建的可持续标杆。

4.2 各方案在案例中的应用情况

在案例中，各通风排烟方案应用情况如下：方案一，机械通风与集中排烟系统广泛应用于长隧道主洞施

工,通过大型轴流风机和风管强制循环空气,设置集中排烟口迅速排烟,冬季表现稳定,提升施工效率,但电力消耗大,对电力供应要求高^[12]。方案二,自然通风与局部排烟结合系统主要用于辅助洞室和短距离作业面,利用自然压差通风,设置移动式排烟机局部排烟,夏季或风力大时节能环保,但冬季或风力小时效果有限,需配合其他措施。方案三,智能通风与智能排烟综合系统在该项目试点应用,融合尖端传感器、自动化控制和物联网技术,实时监控并智能调控通风排烟设备,实现精准通风和高效排烟,但技术复杂度高,初期投资及运行成本高,对技术人员专业素养要求高,推广实施面临挑战。各方案在不同场景下各有优劣,需综合考量^[13]。

4.3 案例方案比选结果与分析

综合评估显示,三种通风排烟方案各具特色。机械通风系统效率高,满足长隧道需求,但成本高昂;自然通风系统节能环保,适合短距离作业,效果有限;智能通风系统技术先进,适应性强,但初期投资大,维护成本高,技术人员需求高。技术上,机械通风需注重设备耐低温及电力稳定;自然通风受自然条件影响大;智能通风面临初期投资大、维护成本高及技术人才短缺挑战。经济上,机械通风虽成本高,但提效显著,缩短工期;自然通风节能,可能影响施工进度和质量;智能通风长期效益好,初期投入大^[14]。因此,需根据隧道实际情况、施工要求及经济条件,科学选择最优方案。

结束语

高寒高海拔地区的长隧道通风排烟方案的选择是一项既复杂又至关重要的任务,需要全面考虑众多因素。各种方案都有其优势和劣势:机械通风虽然效率高,但成本昂贵;自然通风虽然节能,但效果有限;智能通风虽然技术先进,但对技术要求较高。在实际工程中,应依据隧道的具体情况、施工需求以及经济条件,科学地挑选出最佳方案。

参考文献

[1] 卢明安.高海拔长大隧道通风、防灾疏散救援关键

技术研究[J].四川水利,2021(S2):5-10.

[2] 王修彬.东天山特长高海拔公路隧道通风系统优化[J].科学技术创新,2021(19):128-131.

[3] 特来提·艾尼瓦.简述高寒高海拔特殊气候条件下大坝碾压混凝土施工技术[J].水利科技与经济,2021,27(02):83-87.

[4] 纪亚英,张少军,吴建,等.高寒高海拔地区隧道洞口失稳风险评估方法研究[J].公路,2023,68(05):412-417.

[5] 潘洁.城市地下交通联系隧道通风排烟方式的研究[J].智慧城市,2020,6(24):111-112.DOI:10.19301/j.cnki.znccs.2020.24.054.

[6] 刘星宏,林达明,俞缙,等.BIM技术在国内隧道工程中的应用[J].现代隧道技术,2020,57(06):25-35.DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2020.06.004.

[7] 樊康佳.BIM技术在公路隧道工程设计中的应用探索[J].居舍,2020,(13):43.

[8] 池东.某地下单洞双线隧道通风排烟方案研究[J].铁道工程学报,2020,37(04):69-73.

[9] 邓信青.长大公路隧道火灾集中排烟模式排烟效果研究[D].西安建筑科技大学,2019.DOI:10.27393/d.cnki.gxazu.2019.000236.

[10] 李文春.探讨BIM技术在水利水电工程建设中的应用[J].水利建设与管理,2018,38(10):37-40.DOI:10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2018.10.09.

[11] 程奉梅.某城市隧道通风方式优化及火灾烟气控制研究[D].四川师范大学,2018.

[12] 刘英利.复杂隧道多驱动力协同通风排烟的网络模拟及实验研究[D].重庆大学,2017.

[13] 向功兴.隧道工程三维设计技术中BIM的应用[J].珠江水运,2016,(13):84-85.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2016.13.036.

[14] 戴林发宝.隧道工程BIM应用现状与存在问题综述[J].铁道标准设计,2015,59(10):99-102+113.DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.2015.10.023.