

铁道标准设计

Railway Standard Design

ISSN 1004-2954, CN 11-2987/U

《铁道标准设计》网络首发论文

题目: 高寒特长铁路隧道施工机械化及智能通风技术探究
作者: 邵春, 樊纯坛, 梁庆国, 吕晓云, 周仁
DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202305300002
收稿日期: 2023-05-30
网络首发日期: 2023-10-31
引用格式: 邵春, 樊纯坛, 梁庆国, 吕晓云, 周仁. 高寒特长铁路隧道施工机械化及智能通风技术探究[J/OL]. 铁道标准设计.
<https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202305300002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

高寒特长铁路隧道施工机械化及智能通风技术探究

邵春¹, 樊纯坛^{2,3}, 梁庆国², 吕晓云², 周仁⁴

(1. 兰新铁路甘青有限公司, 兰州 730000; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070; 3. 山东职业学院 乌拉尔国际轨道交通学院, 济南 250104; 4. 中铁二局集团有限公司, 成都 610031)

摘要: 为探究适用于高寒特长铁路隧道施工的机械化配套技术, 以西宁至成都铁路甘青隧道为工程背景, 以传统经验选型方法为基础, 采用模糊综合评判法对施工机械进行选型对比分析, 提出高寒特长铁路隧道施工机械化配套技术。同时针对高寒特长隧道洞内缺氧、通风效果较差等特点, 自行研发了智能通风技术。为验证以上技术的可靠性及经济性, 主要从应用效果及节能效果等方面对其进行探讨分析。结果表明: 提出的机械化配套技术及智能通风技术基本可以在高寒特长隧道施工中获得较好的应用效果及节能效果; 以上技术的应用提高了高寒特长隧道施工的机械化及智能化, 可获得较好的社会效益和经济效益。综上可认为本文提出的机械化配套技术及智能通风技术可为高寒地区特长隧道施工提供一定的参考和借鉴。

关键字: 铁路隧道; 机械化施工; 模糊综合评判法; 智能通风技术; 智能化

中图分类号: U25; U455 文献标识码: A DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202305300002

Research on Construction Mechanization and Intelligent Ventilation Technology of Arctic-alpine and Extra-long Railway Tunnel

SHAO Chun¹, FAN Chuntan^{2,3}, LIANG Qingguo², LYU Xiaoyun², ZHOU Ren⁴

(1. Lanzhou-Xinjiang Railway Ganqing Co., Ltd., Lanzhou 730070, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Ural International Institute of Rail Transit, Shandong Polytechnic, Jinan 250104, China; 4. China Railway NO.2 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to explore the mechanized supporting technology suitable for the construction of arctic-alpine and extra-long railway tunnels, the Ganqing Tunnel of Xining-Chengdu Railway is taken as the engineering background. Based on the traditional experience selection method, the fuzzy comprehensive evaluation method is used to compare and analyze the selection of construction machinery, and the mechanized supporting technology for the construction of arctic-alpine and extra-long railway tunnel is put forward. At the same time, intelligent ventilation technology has been developed for the characteristics of hypoxia and poor ventilation effect in the arctic-alpine and extra-long tunnel. In order to verify the reliability and economy of the above technology, this paper mainly discusses and analyzes the application effect and energy saving effect. The results show that: The mechanized supporting technology and intelligent ventilation technology proposed in this paper can basically obtain better application effect and energy saving effect in the construction of arctic-alpine and extra-long tunnel. Moreover, the application of the above technologies improves the mechanization and intelligence of arctic-alpine and extra-long tunnel construction, and can obtain better social and economic benefits. Finally, it can be considered that the mechanized supporting technology and intelligent ventilation technology proposed in this paper can provide some reference for the construction of arctic-alpine and extra-long tunnels.

Key words: railway tunnels; mechanized construction; fuzzy comprehensive evaluation method; intelligent ventilation technology; intellectualization

引言

近年来, 随着经济、互联网技术迅猛发展及施工人员素质的提高, 隧道施工势必会朝着机械化及智能化方向发展, 因此, 需要科学、合理地进行机械化配套及智能化技术探究, 以满足不同类型的隧道施工, 从而使隧道能够快速、安全地施工^[1-2]。目

收稿日期: 2023-05-30; 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968041); 甘肃省优秀研究生“创新之星”项目(2022CXZX-531); 山东职业学院青年科研基金(KYKJ-XYQ-202003)

作者简介: 邵春(1979—), 男, 正高级工程师, 2014年毕业于西安建筑科技大学土木工程专业, 工学学士, 主要从事铁路建设工作, E-mail: 1211368881@qq.com。

通信作者: 樊纯坛(1990—), 男, 讲师, 2017年毕业于兰州交通大学建筑与土木工程专业, 主要从事隧道与地下工程结构稳定分析研究工作, E-mail: 1130569302@qq.com。

前,国内外工程界已普遍认识到隧道机械化配套及智能化技术有着节约能源、施工效率高、降低施工污染及安全可靠等优点,该技术的出现是传统隧道建设的一项重大改革^[3]。

关于隧道施工机械化及智能化技术,学者已做了大量研究。吕建乐^[4]通过对高黎贡山隧道TBM施工中地质风险和设备适应性的分析总结,提出了川藏铁路TBM施工在设备选型方面的改进建议;李荣飞等^[5]依托具体隧道工程,开展了全工序机械化施工作业线配套研究,形成了“1洞9线”施工模式;魏夏鹏等^[6]依托木寨岭公路隧道,为实现预应力锚索钻、装、锚、拉一体化施工,进行了预应力锚索机械化施工关键技术研发;王勇等^[7]结合具体隧道支护工程,介绍了该工程中智能台车机械化施工的详细工艺流程。由此可见,机械化及智能化技术已逐渐在隧道施工中展开应用。但高寒地区的低温、缺氧、低气压等因素则给隧道施工带来了诸多问题,例如对于施工机械而言,高寒环境会导致工程机械功率下降、油耗上升、排放恶化、故障增多、低温启动困难等问题,严重影响整机工作的可靠性^[8-9];对于施工通风而言,高寒地区隧道通风与平原地区相比,存在较大差异。首先,在高寒、缺氧、空气稀薄等条件下修建长大隧道,往往会因为风机工作效率下降,通风距离较长等问题,使洞内缺氧,造成施工机械进气量不足,燃料燃烧不充分,洞内污染严重,加之在高寒低氧环境下,人体对CO等污染物的反应更加敏感。因此,相比平原地区,高寒地区隧道施工时,洞内施工环境控制标准更加严格。其次,由于高寒地区隧道洞内有害气体排放量以及施工人员对氧气需求量的增加,使得高寒地区隧道施工的通风量要大于平原地区,同时由于长大隧道施工时通风距离较长,加大了通风管道的沿程阻力,加之高寒地区洞内气流场和CO等有害气体的运移规律与平原地区存在差异,因此,平原地区的隧道施工通风量和风压等参数,必须按照海拔高度修正后才可应用到高寒地区的隧道施工中^[10-11]。另外,目前关于高寒地区隧道施工机械化及智能化技术的研究还相对欠缺,因此,在高寒地区隧道施工中实施科学合理的机械化配套及智能化技术显得尤为重要。

基于此,以西宁至成都铁路甘青隧道为工程背景,以传统经验选型方法为基础,采用模糊综合评判法对高寒地区特长隧道施工机械进行选型对比分析,提出适用于高寒地区特长铁路隧道钻爆法施工的机械化配套技术。同时针对高寒特长隧道洞内

缺氧及通风效果差等特点,自行研发了智能通风技术。通过从应用效果及节能效果等方面进行的探讨分析,验证了以上技术的可靠性及经济性,可为相似工程施工提供一定借鉴与参考。

1 工程概况

西宁至成都铁路甘青隧道地面高程2700~3750m,相对高差200~600m,标段起讫里程为DK393+033~DK403+529.13,正线长10.496km。该隧道地处高寒地区,气候环境恶劣,地面基岩裸露。主要地层岩性为三叠系燕山期闪长岩及构造岩等。隧道围岩以IV、V级为主,施工方法以全断面钻爆法为主。设计为双线隧道,隧道进口高程3246.7160m,出口高程2756.4857m,隧道出口及洞内施工环境分别如图1、图2所示,最大埋深670m,辅助坑道全长22.528km,其中3号斜井长2985m,4号斜井长2128m。主隧道和辅助通道的平面示意如图3所示。



图1 甘青隧道出口

Fig.1 Ganqing Tunnel exit



图2 甘青隧道洞内施工

Fig.2 Construction in Ganqing Tunnel

2 高寒特长隧道施工机械选型

高寒地区特长隧道施工机械选型,除要考虑高寒地区的环境因素外,还应重点考虑特长隧道对施工效率的要求。通过调研总结发现,目前我国高寒地区特长隧道施工时的机械选型应充分体现“先进性、适用性、高效性”的原则,以达到“快速施工、以机换人”的目标^[12]。

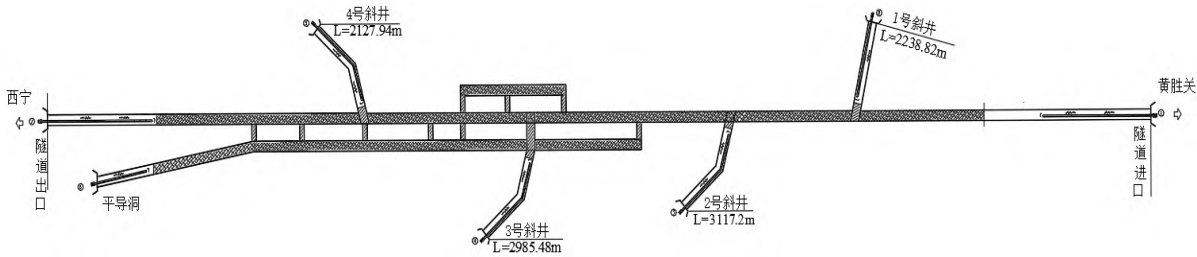


图3 主隧道和辅助通道平面示意

Fig.3 Schematic plan of main tunnel and auxiliary channel

由于目前隧道施工机械种类繁多、性能不一，而且评价影响因素多样，如定量因素（经济指标）、定性因素（安全指标）等，因此，机械选型属于多因素决策问题。由于模糊综合评判法适用于多因素性、不确定性（或模糊性）问题，对事物能给出一个科学性的评价，因此，以传统经验选型方法为基础，采用模糊综合评判法^[13]，对高寒地区特长隧道施工机械进行选型对比分析。

目前，根据机械化施工作业顺序，铁路隧道施工作业线主要包括超前作业线、开挖作业线、初期支护作业线及混凝土衬砌作业线等。受篇幅所限，仅以开挖作业线的主要凿岩设备选型为例，说明模糊综合评判法的应用过程。

2.1 建立因素指标集 U

甘青隧道属于高寒地区特长隧道，相比平原地区，施工设备在选型时应更重视施工工效、施工质量、施工安全及经济指标四个因素，

因素指标集为

$U = (\text{施工工效}, \text{施工质量}, \text{施工安全}, \text{经济指标})$

2.2 建立方案备选集 V

目前我国的凿岩设备主要分为气动凿岩设备及液压凿岩设备。其中液压凿岩设备又称为液压凿岩机，主要有支腿式液压凿岩机和导轨式液压凿岩机两种，导轨式液压凿岩机即为凿岩台车^[14]。因此，甘青隧道的凿岩设备方案备选集为

$V = (\text{凿岩台车}, \text{支腿式液压凿岩机}, \text{气动凿岩设备})$

2.3 建立判断矩阵 K

在对因素指标集 U 中的各个因素进行两两比较，构造判断矩阵 K 之前，需要一个评价标度来表示各因素两两比较的结果。传统的层次分析法采用的是9级标度法，然而实际应用中，往往很难给出精准的比较标度。基于此，以传统的层次分析法为基础，采用模糊综合评判法对其标度法进行改进，最终形成3级标度法，从而减少人为主观判断误差，同时提高判断矩阵的一致性^[15]。因此，采用3级标度法作为模糊评价标度，如表1所示。

表 1 模糊评价标度

Tab.1 Fuzzy evaluation scale

标度	定义
1	因素 u_i 与因素 u_j 同等重要
2	因素 u_i 比因素 u_j 较为重要
3	因素 u_i 比因素 u_j 很重要
1/2	因素 u_i 同因素 u_j 比较时，因素 u_j 比因素 u_i 较为重要
1/3	因素 u_i 同因素 u_j 比较时，因素 u_j 比因素 u_i 很重要

由因素指标集 U 中的各项因素可以看出，各因素对评价结果所起的作用有大有小。由于甘青隧道位于高寒地区，其施工环境具有高海拔、低温、低气压及缺氧等特点，因此，对于甘青隧道而言，所选机械设备首先要确保施工过程中人员安全，同时也能够保证施工质量；其次，针对特长隧道工期紧张的特点，所选机械设备还必须要有一定的施工效率；最后，所选机械要尽量使工程获得较好的施工经济效益。因此，各因素对评价结果所起作用的大小排序为：施工质量=施工安全>施工工效>经济指标。基于上述原则，将各因素两两比较，得到各影响因素二元对比排序赋值表，如表2所示。

表 2 各因素二元对比赋值表

Tab.2 Binary comparison assignment table of each factor

因素		u_j			
		施工工效	施工质量	施工安全	经济指标
u_i	施工工效	1	1/2	1/2	2
	施工质量	2	1	1	3
	施工安全	2	1	1	3
	经济指标	1/2	1/3	1/3	1

由表2可构造判断矩阵 K

$$K = (k_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 3 \\ 2 & 1 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

而且判断矩阵 K 满足 $k_{ij} > 0$, $k_{ij} = 1/k_{ji}$, $k_{ii} = 1$ ($i, j = 1, 2, 3, 4$)。

2.4 建立因素权重集 A

计算各因素的权重值

$$\alpha_i = \left(\prod_{j=1}^m k_{ij} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (i, j=1, 2, 3, 4, m=4) \quad (2)$$

由式 (2) 可求得各因素权重值

$$\alpha_1=0.84, \alpha_2=1.57, \alpha_3=1.57, \alpha_4=0.48。$$

将上述权重值按式 (3) 进行归一化处理。

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^4 \alpha_i} \quad (3)$$

最终可得权重集

$$A = (0.19, 0.35, 0.35, 0.11)$$

2.5 一致性检验

为防止人为差异使判断偏差过大, 从而影响计算结果的准确性, 因此, 需要对判断矩阵做一致性检验。判断矩阵的一致性可用一致性比例 CR 判定, 当 $CR < 0.1$ 时, 认为判断矩阵的评价一致性良好, 若 $CR > 0.1$, 则需要调整判断矩阵^[16]。 CR 可由下列公式计算

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

$$\text{其中, } CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(K \cdot A^T)_i}{n \cdot A^T_i} \quad (6)$$

式中, CI 为一致性指标; n 为判断矩阵阶数;

RI 为平均随机一致性指标, 与 n 值大小有关, 具体取值可参考文献^[16]; λ_{\max} 为判断矩阵最大特征值; 其余符号同前。

将上述已确定的判断矩阵 K 及权重集 A 代入式 (4) ~ 式 (6), 可求得 $\lambda_{\max}=4$; $CI=0$; $CR=0<0.1$ 。说明一致性检验符合要求, 其权重分配较合理。

2.6 确定隶属度函数, 建立模糊矩阵

为得到更加精确的结果, 往往需运用一些分布函数作为隶属度函数来表示模糊集。而目前较为常见的隶属度函数主要有矩形或半矩形分布、梯形或半梯形分布、抛物线分布、正态分布等多种形式^[17]。其中半梯形分布是常用隶属度函数之一, 同时参考文献^[13], 可选偏大型半梯形分布作为因素指标集 U 中各因素的隶属度函数, 如图4所示。

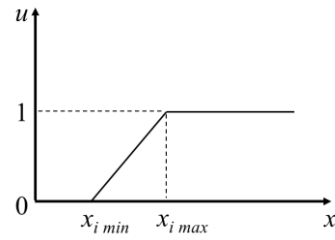


图4 偏大型半梯形分布

Fig. 4 Large semi-trapezoidal distribution

隶属度计算公式为

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \geq x_{i \max} \\ \frac{x_{ij} - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}} & x_{i \min} < x_{ij} < x_{i \max} \\ 0 & x_{ij} \leq x_{i \min} \end{cases} \quad (7)$$

式中, μ_{ij} 为 j 方案 i 因素的隶属度; $x_{i \min}$ 为 i 因素的实测最小值; $x_{i \max}$ 为 i 因素的实测最大值;

根据式 (7) 和表1、表2可得到施工工效、施工质量、施工安全及经济指标的隶属度为

$$r_{1j} = (1, 0.5, 0); r_{2j} = (1, 0.5, 0); r_{3j} = (1, 0.5, 0); r_{4j} = (0, 0.5, 1) \quad (j=1, 2, 3)。$$

则模糊评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.7 模糊综合评判模型

运用模糊数学的基本原理和方法, 模糊综合评判采用如下模型

$$B = A \cdot R = (0.19 \quad 0.35 \quad 0.35 \quad 0.11) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= (0.89 \quad 0.5 \quad 0.11)$$

参考式 (3) 对式 (9) 结果进行归一化处理可得 $B = (0.60 \quad 0.33 \quad 0.07)$ 。

依据最终的模糊综合评判结果, 按照最大隶属度原则, 由方案备选集 V 可以得出: 针对甘青隧道自身特点, 最优的凿岩设备为凿岩台车, 其次为支腿式液压凿岩机, 最后为气动凿岩设备。参考以上分析, 最终甘青隧道施工根据其实际情况选取全电脑三臂凿岩台车作为开挖作业线的主要凿岩机械设备。同理可以对其他各作业线的主要施工机械设备进行对比选型。

3 施工机械化配套技术及应用效果

3.1 机械化配套技术

依据高寒铁路隧道机械化配套施工方案的设置原则, 同时针对甘青隧道低温、缺氧的高原特殊

环境, 结合模糊综合评判法得到的机械设备对比选型结果, 最终确定了适用于甘青隧道的机械化配套技术。具体机械化配套方案见表3, 其中部分机械设备如图5所示。

表 3 隧道钻爆法施工机械及功能
Tab.3 Construction machinery and functions of tunnel drilling and blasting method

作业线项目	机械名称	规格型号	主要功能	数量	备注
超前作业线	全电脑三臂凿岩台车		钻孔、地质分析、超前探孔、激光断面仪	2 台	
	注浆机	SLUB-800	配套管棚、锚杆、小导管注浆	1 台	
开挖作业线	全电脑三臂凿岩台车		3D 轮廓扫描、智能定位、自动钻孔、锚杆施工、自动生成凿岩日志	2 台	
	雾炮		隧道洞内降尘及辅助养护	1 台	
	三维激光扫描仪		全覆盖扫描测绘工作, 为隧洞超欠挖分析, 工程测量计算与控制, 隧道工程 BIM 建模提供了隧道三维点云模型数据	1 台	
初期支护作业线	拱架安装台车		拱架安装、锚杆锚网安装; 辅助装药、辅助测量	1 台	
	锚杆台车	单臂	满足施工图各类型锚杆孔径、长度需求	1 台	
	湿喷机械手	20~30m³/h	初期支护及掌子面封闭等湿喷混凝土作业; 具备遥控喷射功能	1 台	配置 2 台小型湿喷机
混凝土衬砌作业线	自行式液压仰拱栈桥	有效施工长度 24m	仰拱腹模、自动布料、自动振捣整平、止水带卡具	1 台	
	多功能防水板钢筋安装台车	12m	自动行走、自动铺焊、电磁焊机、钢筋安装、热熔垫片激光定位装置	1 台	
	第五代智能台车	长 12m	自动行走、全自动摇控操作旋转分料系统、信息化系统、拱部自动插入式振捣系统、可视化端头模板、防拱部空洞装置、止水带卡具, 柔性搭接	1 台	正洞
	斜井及平导衬砌台车	6m/9m	3#斜井配置带模注浆, 布料系统, 4#斜井、出口平导配置带模注浆	1 台	
	多功能混凝土养护台车		定时喷淋装置、水箱自动恒温加热功能、自动往返行走; 具备二衬检查、敲击、克缺功能	1 台	
	液压自行式水沟电缆槽台车	15m	测量放线、钢筋绑扎、预埋件安装、台车定位及固定、混凝土浇筑	2 套	
	边墙凿毛机		结合面凿毛	1 台	

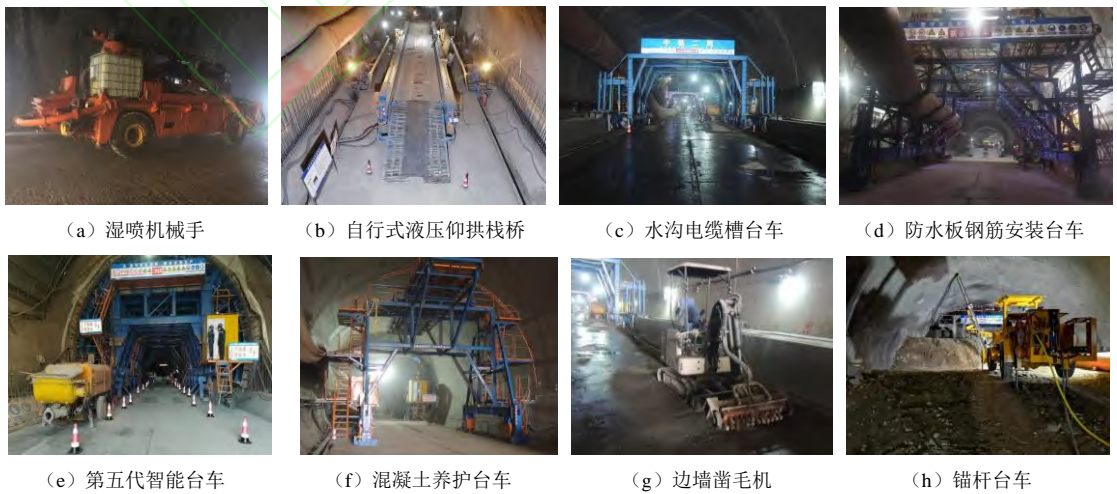


图5 部分机械设备

Fig.5 Part of mechanical equipment

3.2 机械化配套方案应用效果分析

相比于传统的隧道开挖, 地处高寒环境的甘青

隧道采用上述机械化配套方案施工具有诸多优势。

(1) 施工工效方面

首先,甘青隧道超前预报及开挖施工时都采用了全电脑三臂凿岩台车,因此与传统人工钻爆法施工对比优点显著,主要表现在全电脑三臂凿岩台车功率较大,并且相比传统气动凿岩机,其自带的先进凿岩系统可将钻孔效率提高 55%~75%,同时全电脑三臂凿岩台车可以实现多孔同时施工,缩短钻孔时间,而且施工时无需搭建辅助工作平台,相比人工整体施工进度要超出 30% 以上,并且随钻随装爆破炸药,缩短了工序衔接时间。另外全电脑三臂凿岩台车在钻孔的过程中可实时收集分析监测数据(推进速度、冲击压力等参数),从而形成地质报告,同时科学判定前方地质情况,为现场施工提供科学依据。

其次,在初期支护方面甘青隧道采用湿喷机械手(图 5(a)),该机械采用四轮驱动,移动灵活且速度快,由于采用电机驱动,无尾气排放,有利于在高寒缺氧地区施工,而且混凝土喷射作业每循环相比干喷机作业节约用时 2~3h,能够及时高效封闭围岩,提升了工序的衔接性,并且喷混质量提升,减少了处理回弹料的时间。

仰拱施工时,自行式液压仰拱栈桥(图 5(b))相比传统平原隧道使用的简易栈桥,虽然成本较高,但无须人工移动栈桥,整个施工过程能实现全自动操作,提高了施工效率,加快了施工进度;而在电缆槽施工时,甘青隧道采用液压自行式水沟电缆槽台车(图 5(c)),能够实现模板高质量、便捷、快速施工,工序衔接紧凑,施工效率高,同时降低劳动强度。

(2) 施工质量方面

甘青隧道因其地理位置及施工环境的特殊性,对施工质量有着较高的要求。而采用机械化配套施工,相比传统施工方法,能够更为有效地对施工技术规范与质量标准进行控制,减少人为因素。甘青隧道使用的全电脑三臂凿岩台车通过电脑调控,能有效控制隧道开挖轮廓,减少超欠挖情况,施工精度更高,为后续的初期支护、二次衬砌施工提供了保证,同时避免了因欠挖导致钢拱架安装偏位等情况,大大提高了施工质量;湿喷机械手能够更好地避免初支空洞的出现,确保初衬施工的安全性,同时采用雾炮车进行喷雾养护,提升了喷射混凝土的施工质量;多功能防水板钢筋安装台车(图 5(d))具有自动行走、自动铺焊、电磁焊机以及热熔垫片激光定位装置,能够准确保证防水板搭接宽度,防止漏焊,从而提高防水板铺设焊接的质量;而在二衬质量控制系统中最重要的组成部分是第五代智

能台车(图 5(e)),甘青隧道采用的第五代智能台车集成了目前隧道施工中最先进的技术,主要特点包括:顶拱浇筑可视化技术、旋转式布料系统、顶模插入振捣技术、自动送轨走行及纵向快速定位技术、软搭接技术、无线摇控技术以及台车智能电脑信息化集成系统等,大大提升了二衬施工效率及质量,避免了二衬脱空、“月牙形”裂纹等质量通病。

(3) 施工安全方面

首先,甘青隧道采用机械化配套技术施工,提高了机械化程度,减少了掌子面等危险区域的施工人数,从而避免落石、掉块等风险,同时全电脑三臂凿岩台车施工时也大大降低了对隧道围岩的扰动,使其掌子面的稳定性得到了有效控制,降低了隧道失稳的可能性;其次,由于机械的参与,提高了工作效率,能够使衬砌快速封闭成环,有效控制围岩过大的松动变形,确保施工安全;最后由于减少了人工,降低了粉尘产生,从而改善了高寒隧道的施工环境,避免了工人职业病以及高反的产生。

(4) 施工经济性方面

由于甘青隧道采用的施工机械大多具有智能控制系统,能够较为准确的控制施工过程中的下料速度,装药量等参数,从而避免大量浪费;同时,施工效率的提高保证了电动机械施工的有效性,从而减少了电量损耗,据不完全统计,仅机械化湿喷一项便可节省约 35% 的耗电量。

综上所述,本文提出的施工机械化配套技术具有较好的应用效果,提高了高寒地区机械设备的效率及机械化程度,可获得较好的社会效益和经济效益,可为高海拔、低温、低氧地区的特长隧道施工提供一定借鉴。

4 智能通风技术

4.1 风机智慧控制系统

相比平原地区,高寒地区隧道施工时更加不可或缺的施工措施便是施工通风。由于高寒地区隧道修建时,隧道内部因为钻孔、爆破、喷浆、出碴等工序产生大量粉尘,同时由于高海拔氧气稀薄,机械燃料不完全燃烧,产生大量有害气体,严重影响施工人员的工作效率及身体健康。而这种情况尤以高寒地区特长隧道最为严重。基于此,坚持科技引路,积极推行信息化建设,以打造智慧工地为主线,自行开发研制了“中铁二局甘青隧道风机智慧控制系统”,以达到智能通风的目的,其监测系统界面如图 6 所示。

该系统主要通过监测隧道内部的 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$

来控制洞内粉尘浓度, 通过监测氧气浓度来控制洞内有害气体的浓度。该系统运行逻辑流程为: (1) 在风机控制柜旁安装 PLC (可编程逻辑控制器) 控制器, 在掌子面安装 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、氧气传感器; (2) 根据施工现场的实际情况, 参考规范要求, 在施工环境监测系统中分别设定 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 及氧气的高、低速浓度, 同时对应设定风机高、中、低速运行时的频率值; (3) 通过掌子面安装的传感器, 对施工过程中的 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 及氧气浓度进行实时监测; (4) 将设定值与实测值的实时数据汇集到风机控制柜旁的 PLC 进行对比, 根据实时对比结果, 通过 PLC 的可编程功能, 可实现实时有效地调控风机运行数量及功率, 最终实现科学合理地管理隧道内通风, 使空气质量能够快速满足施工要求, 从而减小对施工速率的影响。”



图6 施工环境监测系统界面

Fig.6 Interface of construction environment monitoring system

4.2 风机智慧控制系统应用效果分析

为验证该系统的可靠性, 对甘青隧道3号斜井掌子面附近的施工环境进行现场人工监测。

4.2.1 监测内容

监测内容主要包括隧道洞内出碴施工后的有害气体浓度和粉尘浓度随时间和空间的变化规律。

(1) 有害气体浓度监测

有害气体浓度监测仪如图7(a)所示, 可同时对 CO 、 CO_2 、 SO_2 等有害气体进行监测, 在浓度过高时会启用自动报警模式。经研究发现, 在高寒地区隧道施工产生的有害气体中, 对人体影响最大的气体是 CO 。其原因主要为人体在高寒环境下生理机能会发生很大变化, 而且为了适应高寒地区的低氧环境, 人体自身也会通过调节增大呼吸量, 极易导致施工人员发生 CO 中毒的情况^[18]。因此, 仅重点监测隧道施工过程中 CO 浓度随空间的变化情况。

(2) 粉尘浓度监测

粉尘浓度采用 KC-6120 型大气综合采样器对 TSP 进行采集, 如图7(b)所示, 为保证数据准确

性, 应减小时间变化对粉尘浓度的干扰, 期间每隔 10min 进行一次数据记录, 该仪器对于流量的摄入较为稳定。



(a) 有害气体浓度监测仪



(b) 大气综合采样器

图7 现场监测仪器

Fig.7 Field testing instrument

4.2.2 监测方案

为确保监测数据的稳定性, 在一个工作面同时测量3次, 同一截面取最高值进行记录, 同时将采样点高度设置为距离地面1.6m位置, CO 测点布置如图8所示。随着距离的变化, CO 浓度也会发生相应改变, 因此, 在对 CO 浓度监测时每隔 10m 进行一次记录。

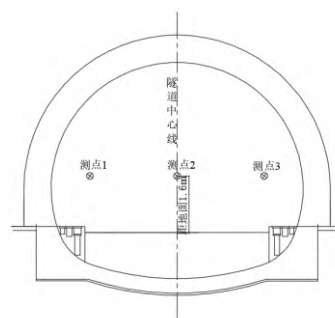


图8 隧道横截面测点布置示意

Fig. 8 Layout of measuring points in tunnel cross section

在对3号斜井粉尘浓度进行测量时, 将仪器架设在距离掌子面15m和20m的位置, 每次间隔10min进行一次数据记录, 同时记录测点温度和时间。

在进行监测时尽量选取风流稳定的地区, 避开风机、风管和车辆等位置, 减小对实测数据的干扰, 在出碴期间进行监测时, 还应注意防止人员遮挡导致数据不准确, 现场监测如图9所示。



图9 现场监测

Fig.9 Field monitoring

4.2.3 监测结果与分析

(1) 粉尘浓度结果分析

为降低监测结果误差,增加可信度,对3号斜井工区两个施工循环内出碴作业时产生的粉尘进行监测,并将两个施工循环内粉尘浓度随时间的变化情况绘制成曲线图,如图10所示。

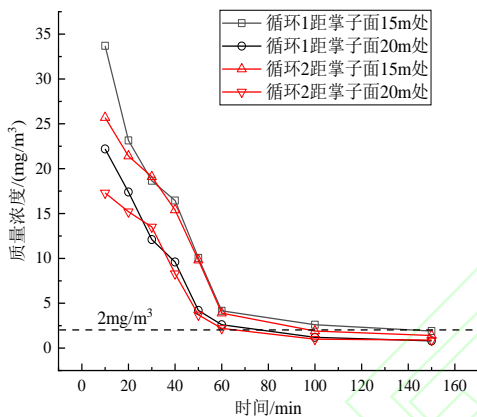


图10 3号斜井工区粉尘浓度随时间变化曲线

Fig.10 Variation curve of dust concentration with time in No.3 inclined shaft work area

由图10可以看出,在两次施工循环中,距离掌子面15m处的粉尘浓度都要大于距离掌子面20m处的粉尘浓度,即距离掌子面越近,粉尘浓度越大,对施工人员的健康越不利。而且随着风机智慧控制系统的运行,两次施工循环的粉尘浓度均在前60min呈迅速降低的趋势,60min后粉尘浓度则逐渐趋于稳定,最终在大约100min时,两次施工循环的粉尘浓度均基本降至《铁路隧道施工通风技术与标准化管理指导手册》中规定的粉尘容许浓度 $2\text{mg}/\text{m}^3$ 。

(2) CO浓度结果分析

隧道内大部分CO来源于爆破和施工机械所产生的废气,在出碴时施工车辆数量相对较多,因此在隧洞出碴作业时按照图8所示测点进行监测,取其中最大值为记录值。对3号斜井工区进行监测,同样取连续两个施工循环的出碴作业通风5min和10min时CO浓度进行记录分析,其浓度随距离变

化曲线如图11所示。

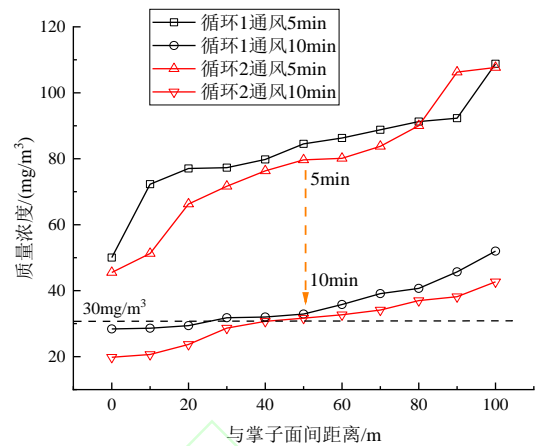


图11 3号斜井工区CO浓度随距离变化曲线

Fig.11 Variation curve of CO concentration with distance in No.3 inclined shaft work area

由图11可以看出,在风机智慧控制系统运行的前5min,距离掌子面约20m范围内的CO浓度降低效果最为明显。而且由于出碴作业时,隧道内CO气体受风机影响逐渐向隧道洞口方向转移,因此,两施工循环均出现了随距离增加CO浓度也逐渐增高的现象。风机智慧控制系统运行10min后,两施工循环的CO浓度均有明显降低,而且在距离掌子面约20m范围内的CO浓度均已降至《铁路隧道施工通风技术与标准化管理指导手册》中规定的CO容许浓度 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 。

4.3 风机智慧控制系统节能效果分析

传统的隧道通风技术在进行风机调速时主要利用不断调节挡板开合程度,从而实现调节风机风量,但其最大缺点是不论隧道洞内需风量多少,风机都以最大负荷运行,以最大频率高速转动,造成电能过度浪费以及设备损耗。

而甘青隧道采用的风机智慧控制系统可根据洞内空气质量的实时监测数据,运用智能变频调速技术对风机系统进行有效调控,即该系统可以根据洞内环境需要,智能调整风机运行数量以及风机转速频率。有研究表明,电机能耗跟风机风速增加近似成三次方的关系^[19-20],所以通过智能调控风机转速频率完全可以达到降低风机能耗并实现高效节能的目的。因此,该风机智慧控制系统相比传统的通风技术有着明显的经济优势。

综上所述,甘青隧道采用的风机智慧控制系统在高寒环境下可获得较好的应用效果,可靠性较好,解决了特长隧道施工时有害气体和粉尘过多、氧气供给不足的问题,可自动保证高寒特长隧道内作业环境良好,满足洞内机械、施工人员的氧气需

要。同时通过智能变频调速技术, 节约了风机应用成本。

5 结论

(1) 结合甘青隧道工程实际, 以传统经验选型方法为基础, 采用模糊综合评判法, 对高寒地区特长隧道施工机械进行选型对比分析, 提出涵盖超前作业、开挖、初期支护、混凝土衬砌等工序的高寒特长铁路隧道施工机械化配套技术。

(2) 从施工工效、施工质量、施工安全及施工经济性等方面对本文提出的施工机械化配套技术进行探讨分析, 该技术在高寒特长隧道施工中可以获得较好的应用效果, 同时该技术提高了高寒地区机械设备的效率及机械化程度, 可获得较好的社会效益和经济效益。

(3) 针对高寒特长隧道施工时洞内缺氧、通风效果较差等特点, 坚持科技引路, 积极推行信息化建设, 自行研发了“中铁二局甘青隧道风机智慧控制系统”, 同时采用人工监测的方法及节能效果分析, 验证了该智能通风系统的可靠性及经济性。

参考文献:

- [1] 李武伦, 蒋证全. 钻爆法施工隧道工装配套设计及工序标准化控制研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 210-217.
LI Wulun, JIANG Zhengquan. Research on Machinery Matching Design and Process Standardization Control in Tunnelling by Drilling and Blasting Method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(6): 210-217.
- [2] 李福献. 公路隧道钻爆法开挖下运输机械数量配置研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 1208-1213.
LI Fuxian. On Quantity Allocation of the Transportation Machinery under the Drilling and Blasting Excavation of the Highway Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 1208-1213.
- [3] 王志坚. 郑万高铁隧道智能化建造技术研究及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1877-1890.
WANG Zhijian. Status and Prospect of Intelligent Construction Technology of Tunnel of Zhengzhou-Wanzhou High-speed Railway[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1877-1890.
- [4] 吕建乐. 川藏铁路隧道机械化施工的认识和建议[J]. 建筑机械化, 2023, 44(2): 9-12.
LYU J L. Understanding and Suggestion on Mechanized Construction of Sichuan-Tibet Railway Tunnel[J]. Construction Mechanization, 2023, 44(2): 9-12.
- [5] 李荣飞, 张晓寿, 杨晓春, 等. 长大隧道全工序机械化施工技术及综合评价分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(2): 213-215.
LI Rongfei, ZHANG Xiaoshou, YANG Xiaochun, et al. Full-process Mechanized Construction Technology and Comprehensive Evaluation Analysis of Long and Large Tunnels[J]. Engineering and Technological Research, 2023, 8(2): 213-215.
- [6] 魏夏鹏, 汪波, 陈伟祥, 等. 软岩大变形隧道预应力锚索一体化施工设备与机械化配套工艺研究——以木寨岭公路隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(1): 161-172.
WEI Xiapeng, WANG Bo, CHEN Weixiang, et al. Integrated Construction Equipment and Mechanized Supporting Technology of Prestressed Anchor Cable for Muzhailing Highway Tunnel in Soft Rock with Large Deformation[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(1): 161-172.
- [7] 王勇, 蒋松余, 吴吉云, 等. 智能台车机械化支护在隧道施工中的应用[J]. 工程建设与设计, 2022(21): 133-136.
WANG Yong, JIANG Songyu, WU Jiyun, et al. Application of Intelligent Trolley Mechanized Support in Tunnel Construction[J]. Construction and Design for Engineering, 2022(21): 133-136.
- [8] 周路军, 蒋立, 陈军, 等. 川藏铁路隧道TBM适应性及钻爆法机械化配套研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 52-56.
ZHOU Lujun, JIANG Li, CHEN Jun, et al. Research on TBM Adapability and D & B Construction Machine Matching Technology for the Sichuan-Tibet Railway Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 52-56.
- [9] 王飞阳, 周凯歌, 周路军. 川藏铁路隧道机械化配套施工适应性研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 57-62.
WANG Feiyang, ZHOU Kaige, ZHOU Lujun. Study on Adaptability of Mechanized Matching Construction of Sichuan-Tibet Railway Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 57-62.
- [10] 史柯峰, 刘垚, 张越, 等. 基于隧道新风量需求的活塞风井方案特性研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(10): 111-117.
SHI Kefeng, LIU Yao, ZHANG Yue, et al. Study on Characteristics of Piston Vent Shafts Design Schemes Based on Tunnel Fresh Air Demand[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(10): 111-117.
- [11] 何知思, 曾鹏, 钟勇奇, 等. 壁板坡特长隧道施工通风的影响因素分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(5): 91-94.
HE Zhisì, ZENG Peng, ZHONG Yongqi, et al. Analysis of Construction Ventilation Influencing Factors of Bibanpo Extra-long Tunnel[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(5): 91-94.

- [12] 邢泊, 冯欢欢. 川藏铁路隧道高海拔环境钻爆法施工装备选型配置思考[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(10): 1644-1653.
- XING Bo, FENG Huanhuan. Suggestions and Considerations on Equipment Selection for Constructing Sichuan-Tibet Railway Tunnels at High Altitudes[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(10): 1644-1653.
- [13] 刘春阳. 高原特长隧道安全快速施工技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- LIU Chunyang. Study of Rapid Construction Technique for Long and Large Tunnel in Plateau[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [14] 郑朝保, 张龙, 冯中兴, 等. 我国隧道凿岩设备的应用与发展[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 9-13, 24.
- ZHENG Chaobao, ZHANG Long, FENG Zhongxing, et al. Development and Application of Rock-drilling Equipment in China[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4): 9-13, 24.
- [15] 张洪宾, 陈慈, 李梦琦, 等. 基于三标度层次分析法的驾驶人路径选择模型[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(20): 369-374.
- ZHANG Hongbin, CHEN Ci, LI Mengqi, et al. Route Choice Decision Model for Driver Based on Three-scale Analytic Hierarchy Process[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(20): 369-374.
- [16] 王恩茂, 刘晓君. 层次分析与模糊综合评判法在节能住宅设计方案优选中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2007(2): 146-149.
- WANG Enmao, LIU Xiaojun. Application of Analytic Hierarchy Process and Means of Fuzzy Comprehensive Evaluating in Choosing Optimal Plan of Design about Energy Efficient Residential Buildings[J]. Sichuan Building Science, 2007(2): 146-149.
- [17] 明杨. 基于模糊综合评判法的公路膨胀土边坡稳定性分级研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2021.
- MING Yang. Study on Stability Classification of Highway Expansive Soil Slope Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2021.
- [18] 刘祥. 雀儿山高海拔特长公路隧道施工通风关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- LIU Xiang. Study on Key Technique of Construction Ventilation for Extra-long Highway Tunnel at High Altitude on Queer Mountain[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [19] 王君楼. 软弱围岩隧道钻爆法机械化施工关键技术及装备[J]. 铁道建筑, 2023, 63(6): 94-98.
- WANG Junlou. Key Techniques and Equipments for Mechanized Construction of Drilling and Blasting Tunnel in Weak Surrounding Rock[J]. Railway Engineering, 2023, 63(6): 94-98.
- [20] 薛超. 基于变频调速的隧道通风控制系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- XUE Chao. The Research of Tunnel Ventilation Control System Based on Frequency Conversion Speed Regulation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.