

高寒高海拔地区特长公路隧道多工作面通风优化研究

余昌平

华北水利水电大学 河南 郑州 450000

摘要:为解决天山胜利隧道(22.13km)高寒高海拔环境下多工作面施工通风难题,本研究提出基于交替施工的通风优化方案。通过理论计算确定单个工作面需风量(1980m³/min)及风机功率,对比“多工作面同时施工”与“交替施工”两种模式,发现交替施工方案可降低总功率至原方案的39.27%,显著节约能耗。同时,提出射流风机分段布置策略(主洞每段1台,服务隧道入口段3台)及智能化通风控制系统。研究成果可为类似工程提供技术参考。

关键词:高寒高海拔;特长隧道;通风优化;交替施工;射流风机

1 引言

随着公路建设越来越向中西部地区深入,隧道建设海拔越来越高、长度越来越大,与此同时给隧道的施工通风也带来了越来越多的困难。隧道面临着开挖长度大、氧气浓度低、施工条件差等困难。在特长隧道的开挖过程中,为加快施工进度多采用工作面同时施工的手段,此时就会出现通风距离长、需风量大的问题。而现如今大多数隧道施工通风研究为短距离单洞独头送风,而鲜有对长距离多工作面同时供风的计算研究。本文以该隧道为例,提出兼顾效率与能耗的通风优化方案,重点解决长距离多工作面供风难题。

2 工程概况与通风要求

2.1 工程概况

天山胜利隧道全长22.13km,最大埋深1112.66m,海拔3500-4280m,大气压强低、空气密度小,工人高原反应严重,施工通风要求极高,供风技术难度极大。

采用主洞钻爆法+服务隧道TBM法组合施工。施工高峰期需同时保障7个工作面通风,供风距离长、阻力大。

2.2 通风技术标准

洞内施工人员每人供应新鲜空气不低于4m³/min,使用内燃机机械作业时不低于4.5m³/(min·kW)。隧道施工作业过程中始终保持空气中含氧量达到19.5%以上。有害气体限值按高原标准控制(如海拔>3km时,CO≤15mg/m³)^[1]。

3 多作业面通风计算与方案比选

3.1 多工作面施工通风方式

天山胜利隧道现场通风组织在左洞洞口处1#风机负责向左洞1#掌子面供风,污风从左洞洞口排出;右洞洞口处4#风机负责向右洞2#掌子面供风,污风从右洞洞

口排出;服务隧道有两台风机,2#风机负责向隧道左洞的3#、5#和服务隧道掌子面供风,其风管在横通道处分流向左洞掌子面供风,其污风经射流风机加压后从服务隧道口排出;3#风机仅向右洞4#、6#掌子面供风,供风模式与2#风机一样。左洞1#、3#、5#掌子面风管直径为2m,右洞2#掌子面风管直径为2m,右洞4#、6#掌子面风管直径为1.8m;服务隧道左侧风管直径2m,服务隧道右侧风管直径为1.8m。

3.2 单个断面施工所需风量计算方法

隧道施工通风所需风量的计算不仅与隧道的实际施工情况有关,还与隧道的开挖方式有关,目前应用最广的方法主要是根据施工人数、炸药爆破烟尘、内燃机产生的废气、洞内最小允许风速这四种条件来计算需风量,最后将4个计算值中的最大值的风量作为施工通风所需风量。由于隧道位于高海拔地区,气压强度小、空气密度低的特点,也需要根据海拔高度进行空气密度修正。

(1)以洞内最多同时作业的人数

$$Q_1 = kmq$$

(2)按同时爆破的最多炸药计算风量

①压入式通风

$$Q_2 = \frac{7.8}{t} \times \sqrt[3]{A \times S^2 \times L_1^2}$$

②混合式通风

$$Q_2 = \frac{7.8}{t} \times \sqrt[3]{A \times S^2 \times L_2^2}$$

(3)根据内燃机运行需求,稀释废气需要

$$Q_3 = q \cdot H_0 \cdot k_1 \cdot k_2$$

(4)以洞内允许最小风速

$$Q_4 = 60 \times v \times S$$

(5)根据海拔高度对空气密度进行修正

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{Z}{44300} \right)^{4.256} = 0.9109 \text{ kg/m}^3$$

作者简介:余昌平,1985年11月,男,正高级工程师,大学本科,主要从事公路、桥梁及隧道施工技术研究。

3.3 施工参数及开挖所需风量计算

(1) 施工参数

由于隧道位于高寒高海拔地区空气密度和大气压强相对较低，因次在施工过程中所需的风量与平原地区大不相同，具体通风参数如下表1所示。

表1 通风参数表

施工参数要求		
隧洞	主洞	服务隧道
每个掌子面作业人数	22人	18人
每人应供应新鲜空气	4m³/min	4m³/min
空气中氧气含量	19.5%以上	19.5%以上
风管平均百米漏风率	β = 0.02	β = 0.005或0.02
风管摩擦系数	λ = 0.017	λ = 0.017
每次爆破用炸药量	A = 0.48t	A = 0t
隧道工作断面	S = 110m²	S = 50m²
断面最小回风风速	Vmin ≥ 0.3m/s	Vmin ≥ 0.5m/s

爆破完成后30min以内距离掌子面100m范围内无烟。

在高海拔地区以内燃机为动力的机械，其燃烧效率相比于平原地区明显降低，内燃机所需的风量和产生的污染物也相对增加。

(2) 风量计算

选择在施工通风所需风量的计算中，按洞内同时作业人数最多、同时爆破炸药最多、内燃机作业废气稀释、洞内允许风速最小所需风量作为最大值。

表2 4种情况所需风量计算对比表

计算方式	计算结果 (m³/min)	
	主洞	服务隧道
以洞内最多同时作业的人数	105.6	86.4
按同时爆破的最多炸药计算风量	1006.9/399.6	0/0
根据内燃机运行需求，稀释废气需要	1012.5	0
以洞内允许最小风速	1980	1500

4 通风方案优化及策略比选

4.1 轴流风机功率计算方法

(1) 通风机的风压克服的阻力是沿风管（或风道）的风阻和局部风阻的总和，因此在计算风压时，应将以下因素全部考虑在内^[2]。

- ①风机风压比通风管道阻力大；
- ②风管（或风道）沿程摩擦阻力；
- ③隧道内沿程摩擦阻力；
- ④局部阻力；
- ⑤沿程摩擦阻力及局部阻力组成通风阻力；

(2) 采用分阶段施工通风，采用了压入式通风方式与“风管+风仓+风管供风”的通风方式。各施工阶段的通风长度和通风方式都会根据施工进度变化，沿路阻力也会有所变化，需要计算最大风压：

通风风机风压：

$$P_{\text{风机}} \geq P_{\text{阻}} = P_{\text{沿程阻力}} + P_{\text{局部阻力}} + P_{\text{动压}}$$

①动压

$$P_{\text{动}} = \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2$$

②摩擦阻力

$$h_f = \frac{400\lambda\rho}{\pi^2 d_1^5} \cdot \frac{1 - (1 - \beta)^{\frac{2L}{100}}}{\ln(1 - \beta)} \cdot Q_0^2$$

③局部阻力

$$\Delta P_{\xi} = \sum \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2$$

(3) 风机功率

$$W = QHK_1 / (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3)$$

4.2 通风方案一

根据上述具体的通风模式，对左右洞和服务隧道7个工作面同时施工时的通风阻力及风机功率进行计算，结果如表3、4所示。

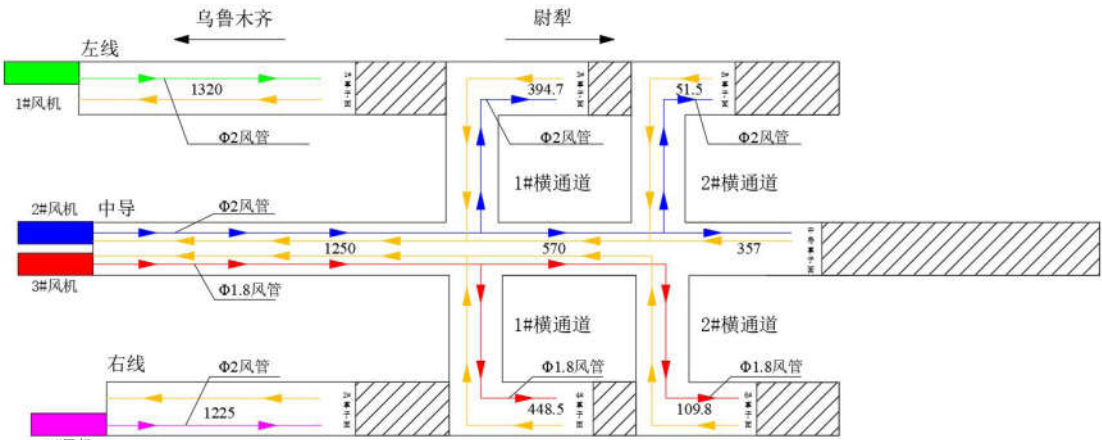


图1 隧道施工通风布置图

表3 1#、2#风机功率及通风阻力计算统计表

隧道左洞										
7个工作面同时施工	风机	工作面	通风长度 (m)	供风量 (m³/min)	风管直径 (m)	沿程阻力 (Pa)	动压 (Pa)	局部阻力 (Pa)	计算功率 (kw)	风机功率 (kw)
	1#风机	主洞入口	1320.0	1980.00	2	744.93	50.30	148.99	64.02	1135.73
		1#主洞	394.7	1980.00	2	182.77	50.30	36.55	15.16	
		2#主洞	51.5	1980.00	2	22.23	50.30	4.45	4.04	
	2#风机	服务隧道掌子面-2#横通	357.0	1500.00	2	89.11	28.87	17.82	5.44	
		服务隧道1#-2#	570.0	3527.79	2	795.44	159.69	159.09	106.07	
		服务隧道1#横通-服务隧道入口	1250.0	5774.38	2	4838.10	427.85	967.62	1005.02	
计算总功率 (kw)										1199.75

表4 3#、4#风机功率及通风阻力计算统计表

隧道右洞										
7个工作面同时施工	风机	工作面	通风长度 (m)	供风量 (m³/min)	风管直径 (m)	沿程阻力 (Pa)	动压 (Pa)	局部阻力 (Pa)	计算功率 (kw)	风机功率 (kw)
	4#风机	主洞入口	1225	1980	2	677.06	50.30	135.41	57.38	705.38
	3#风机	1#主洞	448.5	1980	1.8	355.70	76.59	71.14	28.62	
		2#主洞	109.8	1980	1.8	81.22	76.59	16.24	9.24	
		服务隧道1#-2#	570	2024.41	1.8	469.68	80.07	93.94	34.17	
		服务隧道1#横通-服务隧道入口	1250	4250.79	1.8	4440.07	353.16	888.01	633.35	
	计算总功率 (kw)									

计算结果显示在7个工作面同时工作时，服务隧道处的2#、3#风机的风机功率最大分别为1135.73kw和705.38kw，各占总功率的57.87%和35.94%，1#、4#风机仅占总功率的3.26%和2.92%。服务隧道的2#、3#号风机总功率约是主洞1#、4#风机总功率的15倍，这主要是由于服务隧道处的风机供风距离长、供风工作面多和风管分流局部阻力增大所引起的。7个工作面同时施工时，左洞、右洞及服务隧道风机功率总和为1962.51kw。

4.3 通风方案二

方案二的通风布置形式与方案一相同，但施工顺序不同，如图2所示。隧道左洞新增开的3#、5#掌子面及隧道右洞新增开的4#、6#掌子面在施工过程中采用工序相互交替或部分工序交替施工的方式进行，施工过程中将采用3#、5#掌子面、4#、6#掌子面或部分掌子面中仅有

一个掌子面有人员作业，如立拱架、打孔等工序，在施工过程中，比如隧道左洞内将采用3#掌子面没有内燃机机械设备作业和爆破、排烟、出渣、喷浆等工序，此时掌子面根据施工人员需要的风量进行供风，考虑到一定的安全储备，需要400m³/min的风量。

计算结果显示服务隧道处的风机功率依然比主洞处风机功率大，2#和3#风机功率为465.85kw和183.45kw分别占总功率的60.45%和23.80%；1#和4#风机功率为64.02kw和57.38kw相比于方案一占比有所增加分别为8.31%和7.45%，其主要原因是服务隧道供风断面多且通风阻力大。但方案二采用交替施工的工序时，其同一时间的需风量相比于方案一较小，服务隧道处的2#、3#风机功率大幅度降低，约为方案二的41.02%和26.01%，方案二的所有风机总功率是方案一的39.27%。

表5 1#、2#风机功率及通风阻力计算统计表

隧道左洞										
7个工作面交替施工	风机	工作面	通风长度 (m)	供风量 (m³/min)	风管直径 (m)	沿程阻力 (Pa)	动压 (Pa)	局部阻力 (Pa)	计算功率 (kw)	风机功率 (kw)
	1#风机	主洞入口	1320.0	1980.00	2	744.93	50.30	148.99	64.02	465.85
		1#主洞	394.7	400.00	2	7.46	2.05	1.49	0.12	
		2#主洞	51.5	1980.00	2	22.23	50.30	4.45	4.04	
	2#风机	服务隧道掌子面-2#横通	357.0	1500.00	2	89.11	28.87	17.82	5.44	
		服务隧道1#-2#	570.0	3527.79	2	795.44	159.69	159.09	106.07	
		服务隧道1#横通-服务隧道入口	1250.0	4063.24	2	2395.57	211.85	479.11	350.18	
计算总功率 (kw)										529.87

表6 3#、4#风机功率及通风阻力计算统计表

隧道右洞										
7个 工作 交替 施工	风机	工作面	通风长度 (m)	供风量 (m³/min)	风管直径 (m)	沿程阻力 (Pa)	动压 (Pa)	局部阻力 (Pa)	计算功率 (kw)	风机功率 (kw)
	4#风机	主洞入口	1225	1980.00	2	677.06	50.30	135.41	57.38	183.45
	3#风机	1#主洞	448.5	400.00	1.8	14.52	3.13	2.90	0.24	
		2#主洞	109.8	1980.00	1.8	81.22	76.59	16.24	9.09	
		服务隧道1#-2#	570	2024.41	1.8	443.59	80.07	88.72	33.46	
		服务隧道1#横通-服务隧道入口	1250	2521.03	1.8	1561.73	124.17	312.35	140.66	
计算总功率 (kw)										240.83

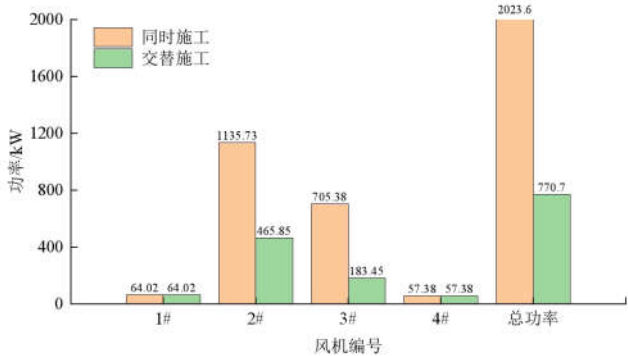


图2 两种施工条件下风机功率对比图

根据方案对比，主洞1#、4#风机在两种施工条件下的风机功率没有发生变化，而在采用交替施工时服务隧道的2#、3#风机功率相比于同时施工时出现大幅度降低，风机总功率也下降了一半以上。综上所述，采用方案二的交替施工方法，可有效降低施工成本，减少材料费的投入且符合现场施工条件有助于提高施工安全性。

4.4 智能化中央控制系统

在通风机设备上提前安装智能控制操作系统，根据检测通风管内的通风压力和各掌子面的工作状态，在洞外操作平台对通往各掌子面的风量大小进行灵活控制。服务隧道内各掌子面的工作通风需要，通过调配各掌子面的通风需求来满足，可以做到根据现场实际施工情况调配各掌子面通风大小。

5 射流风机通风阻力计算

(1) 射流风机产生的压力需要克服通风区段的阻力

$$\Delta p_r \geq \sum H_s + \sum H_L$$

公式中： H_s 是摩擦阻力； H_L 为局部阻力，以天山胜利隧道来说，每800m设置一条横向通道，相对于沿路的摩擦阻力来说，局部阻力较小，微乎其微；所以上式可以简化成以下几种形式：

$$\Delta p_r = \sum \lambda_i \cdot \frac{L_i}{d_i} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2$$

(2) 射流风机升压力计算公式如下：

$$\Delta p_j = \rho \cdot v_j^2 \cdot \frac{A_j}{A_r} \cdot \left(1 - \frac{v_r}{v_j}\right) \cdot K_2$$

计算结果可知，由于3#、4#、5#、6#掌子面均与横通道相连，且横通道长度较短，3#、4#、5#、6#掌子面可不设置射流风机，在横通道内设置1台射流风机，将工作面3、4、5、6区段内的引导排至服务隧道内，采用1台TJR.80.37型射流风机即可满足施工通风要求；1#、2#掌子面采用1台TJR.80.37型射流风机，在隧道中间部位设置；服务隧道入口-2#横通处设置3台射流风机，间距455m。

6 施工通风辅助控制措施

(1) 雾炮、水雾降尘

隧道内设置智能喷淋养护台车和雾炮水车（多功能清扫车）降尘设备。配有洒水系统的多功能清扫车可实现自动洒水降尘，在隧道内实施喷淋降尘，对环境空气起到净化作用^[3]。

(2) 可移动净化机

建筑施工产生的粉尘会进入肝脏、血液、肺部，从而导致各种疾病，对工人的身心健康造成影响。隧道内配置监控和净化设备，使用机动的除尘净化设备，有效改善特殊隧道的施工环境，保障施工人员的身心健康，具有机动灵活、工作速率快、效果明显等优点。

7 施工通风监测

为进一步验证施工方案可实施性及合理性，根据天山胜利隧道施工进度情况在各掌子面后方安装固定式全自动气象观测站，监测并收集风速、风向、气温、气压、湿度等数据指标，进行各项数据分析，进一步验证优化施工方案。后期随着各掌子面的不断向前推进，采取风机进洞的方法缩短供风距离，进一步节约能耗。

8 结论

(1) 钻爆法开挖时，主洞单掌子面需风量为1980m³/min（爆破排烟控制）；

(2) 采用7个工作面交替施工的方法,所需的风机总功率大幅度下降仅为同时施工时的39.27%。

(3) 流风机优化布置:主洞1、2#工作面各1台,服务隧道入口段3台(间距455m),横通道1台;

(4) 高寒高海拔特长隧道需统筹施工组织与通风设计,通过辅助坑道优化、缩短独头通风距离确保通风效果。

参考文献

[1]张仕杰.浅谈高原地区长大隧道施工通风风量计算[J].铁道标准设计,2010,No.583(S2):60-62.

[2]景通,齐双全,何慧慧.隧道群施工通风计算与设备选型[J].黑龙江交通科技,2020,43(01):153-155+157.

[3]张克智.长大隧道通风施工理论计算与施工技术[J].甘肃科技纵横,2009,38(05):110-111+65.