

DOI: 10.7672/sgjs2025070163

深汕西高速超大跨隧道机械化设计与施工技术*

左小伟

(中铁十一局集团第四工程有限公司,湖北 武汉 430073)

[摘要] 为保证超大跨隧道施工的安全性,提升隧道施工效率,采用资料调研、工程类比、理论分析、数值模拟等方法,基于双洞八车道的城仔山超大跨隧道工程实例,依据隧道开挖断面、机械化施工工艺的特点和需求,以安全、高效作为评价基准,对超大跨隧道的施工工法、大型施工装备选型及支护参数等方面进行研究,提出了基于洞周岩性分布的超大跨隧道机械化施工工法设计体系,并通过实际工程的数值模拟分析验证了该设计体系的场景适用性及可行性。结果表明,施工造成的应力、应变均在可接受范围内,该设计体系合理,具有推广价值。

[关键词] 隧道;支护;机械化;数值模拟;设计;施工

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0163-06

Mechanized Design and Construction Technology of Shenzhen-Shantou West Expressway Super-large Span Tunnel

ZUO Xiaowei

(China Railway 11th Bureau Group No. 4 Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430073, China)

Abstract: To ensure the safety of super-large span tunnel construction and improve the efficiency of tunnel construction, data research, engineering analogy, theoretical analysis, numerical simulation, and other methods are used to study the construction method, large-scale construction equipment selection, and support parameters of super-large span tunnels based on the engineering example of Chengzishan super-large span tunnel with two tunnels and eight lanes. According to the characteristics and requirements of tunnel excavation sections and mechanized construction technology, the construction method, large-scale construction equipment selection, and support parameters of super-large span tunnels were studied, with safety and efficiency as the evaluation benchmark. The design system of the mechanized construction method for super-large span tunnels based on the lithology distribution around the tunnel was proposed, and both the applicability and feasibility of the design system were verified by numerical simulation analysis of the actual projects. The results indicate that the stress and strain caused by construction are within the acceptable range, and the design system is reasonable and has the value of popularization.

Keywords: tunnels; supports; mechanization; simulation; design; construction

0 引言

随着交通运输行业的快速发展,越来越多的超大跨隧道在新建、扩建公路项目中得以应用。由于其跨度大、断面大、扁平率小,使其工程安全面临更复杂的条件,隧道机械化施工既是满足工程安全、质量、进度需要的现实要求,也是符合时代发展趋势的必然选择。因此,为保证超大跨隧道施工的安

全性,提升隧道施工效率,保障超大跨隧道在施工及运营期间的安全性,选取恰当的施工技术和开挖支护参数显得尤为关键。

有研究人员以京张高铁八达岭长城站为工程背景,采用数值模拟等方法,对超大断面隧道的开挖方法、支护参数设计以及围岩变形控制等进行研究,为超大跨隧道施工技术的选取提供参考^[1-4]。有研究人员依托实际项目,采用数值模拟对超大断面隧道的开挖方法进行设计及模拟验证,为超大跨隧道开挖方法选取提供参考^[5-9]。李佳旺^[10]针对郑

* 湖北省技术创新专项(2022BEC02)

[作者简介] 左小伟,高级工程师,E-mail:389227655@qq.com

[收稿日期] 2024-12-30

万高铁湖北段大断面隧道开展研究,提出了郑万高铁隧道支护参数理论优化方案,并对优化后的实际效果进行了安全性和经济性评价。He 等^[11]为解决山地软岩巷道的大变形问题,提出补偿开挖法,成功抵消了挖掘效应,并通过对木寨岭隧道和长宁隧道的工程实例研究,论证补偿开挖方法的有效性和可行性。Xu 等^[12]采用正交试验法,以隧道开挖跨度、围岩强度和岩石完整性系数为主要控制因素,确定了超大跨隧道的适宜施工方法。由于可借鉴的工程经验有限,超大跨隧道的施工工法、支护形式、开挖进尺、支护参数等均缺乏统一的认识,且现有的隧道规范和标准均未作出相关规定,无法形成系统、适用的设计理论方法及相应的配套施工技术。

本文采用资料调研、工程类比、理论分析、数值模拟等方法,基于双洞八车道的城仔山超大跨隧道建设实例,对超大跨隧道的施工工法、大型施工装备选型及支护参数等方面进行研究,得出了超大跨公路隧道机械化施工力学规律,提出了基于洞周岩性分布的超大跨隧道机械化施工工法设计体系,以期为此类工程提供参考。

1 工程概况

项目起点为广东省陆丰市潭西镇,与深汕东高速相接,路线由东往西依次经过海丰县、汕尾城区、深汕合作区,在惠东县吉隆镇与 SJT2 合同段相接。由于深汕西高速建设年代较早,横向贯穿深汕合作区,土地分割严重,不便于合作区整体规划建设,因此合作区提出改线要求,释放沿海优质土地资源。

隧道群段主要集中在改线新建范围内,设置 4 座双洞八车道隧道,隧道最大开挖宽度 22.65m,开挖高度 14.50m,开挖断面达 254.5m²,设计时速 120km/h。本文主要以双洞八车道的城仔山超大跨隧道为例进行介绍。

2 超大跨隧道施工方法

2.1 基于洞周岩性分布的工法设计

通过对国内外知名超大断面隧道的施工工法

进行调研,建立计算模型,深入分析工法的适用范围,统计了基于洞周岩性分布的适用工法,如表 1 所示。

以洞身位于中风化层为例,根据调研结果,常用工法主要有 CD 法和三台阶法。通过建立计算模型,分析 CD 法和三台阶法在强风化层和中风化层中的变形规律,进一步得出相应工法的适用范围。通过 CD 法和三台阶法的变形对比,分析隧道顶部中风化砂岩厚度与拱顶沉降变化的关系,如图 1 所示。由图 1 可知,在中风化层内,采用台阶法开挖变形合理,变形发展平顺,同时结合三车道隧道加宽段的成熟施工经验可知,采用台阶法可行性较高。

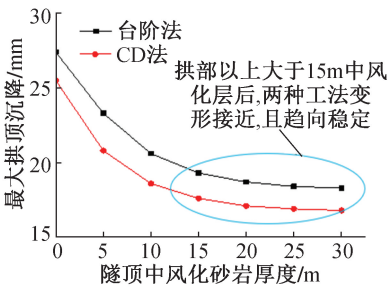


图 1 不同中风化层厚度下 2 种工法的变形对比
Fig. 1 Comparison of deformation of two construction methods under different medium regolith thicknesse

本项目隧址区地形地貌条件较好,不存在严重偏压地形,洞口浅埋段主要为全~强风化砂岩,洞身以中风化砂岩为主,地下水较少。结合项目特点,针对广东省常规工程地质条件的类似项目,提出以洞身特定岩性的岩层覆盖厚度作为施工工法和支护参数选用的定性标准。

以城仔山隧道为例,根据上述适用工法的选用方法及城仔山隧道的地质勘探图,设计出了如表 2 所示工法。

2.2 机械化配套设计

对各隧道进行机械化配套设计,构建各隧道机械化施工、人工施工计算模型,通过 6 座隧道的实际

表 1 基于洞周岩性分布的适用工法
Table 1 Applicable construction method based on the lithological distribution around the cave

序号	洞周岩性分布	适用工法	步距/m
1	浅埋段、洞身及拱部以上均为全风化砂岩层	双侧壁导坑法	上下台阶≤5
2	浅埋段、洞身主要为强风化,拱部以上主要为全风化砂岩层	双侧壁导坑法	上下台阶≤5
3	洞身及拱部以上均为强风化砂岩层	CD 法	上下台阶≤10
4	洞身主要为中风化,拱部以上主要为强风化砂岩层	CD 法	上下台阶≤15
5	洞身及拱部以上 15m 左右范围内主要为中风化砂岩层	CD 法/三台阶法	上下台阶≤20
6	洞身及拱部以上均为中风化砂岩层	三台阶法	上下台阶≤20
7	洞身主要为微风化,拱部以上主要为中风化砂岩层	三台阶法/上下台阶法	上下台阶≤30
8	洞身及拱部以上均为微风化砂岩	上下台阶法	上下台阶≤30

表 2 城仔山隧道施工工法设计

Table 2 Design of construction method of Chengzaishan tunnel

位置	长度/m	埋深/m	工法	围岩情况
进口端	229	4~44	双侧壁导坑法	强风化为主,洞口段局部位于全风化,洞身段局部位于中风化
	125	49~75	CD 法	中风化为主,拱顶中风化平均层厚 15m,局部进入微风化
	254	≥75	台阶法	洞身位于微风化,拱部以上中风化层厚>20m
洞身	1 040	—	三台阶法	微风化层
	356	≥115	三台阶法	微风化层
出口端	172	47~115	CD 法	微风化层
	140	4~47	双侧壁导坑法	强风化,中~微风化各占约一半

情况,结合以往的隧道开挖经验,设计 6 座隧道在机械化施工及人工施工情况下每次开挖间距,模拟 2 种不同的施工参数对 6 座不同隧道的影响,并计算 6 座隧道在机械化施工和人工施工时的总工期,对比结果如图 2 所示,采用机械化配套施工,全线隧道工期均可不同程度缩短。以城仔山隧道为例,采用大型机械配套双向施工(见表 3),预计可缩减约 6 个月工期,其余 5 座隧道采用类似的全工序大型机械配套施工。

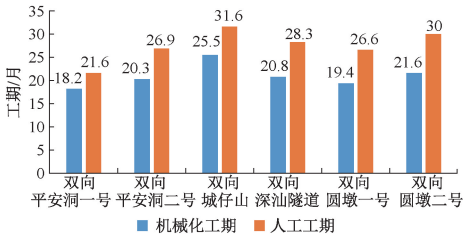


图 2 机械化施工与人工施工总工期对比

Fig. 2 Comparison of the total construction period of mechanized construction and manual construction

2.3 机械化施工支护参数设计

采用 FLAC 3D 以单洞四车道分离式隧道 V_d 型复式衬砌设计断面为准,建立三维数值模型(见图 3),模拟隧道机械化双侧壁导坑法分部开挖、超前支护施作、洞身支护施作等施工过程,通过对比选

择合适的加固措施及参数。

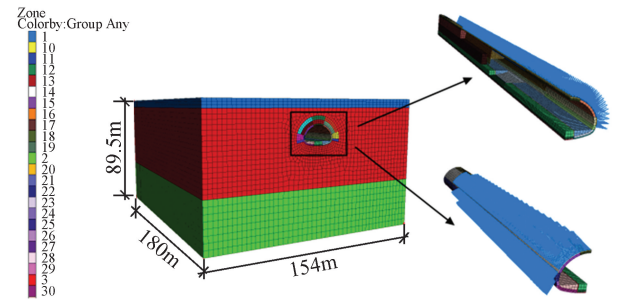


图 3 双侧壁导坑计算模型

Fig. 3 Calculation model of a double-sidewall pilot pit

数值模拟的选取范围为沿隧道开挖方向(y 轴)取 100m、沿隧道横向(x 轴)取 154m、沿隧道竖直方向(z 轴)取 81m,大于 3 倍跨度,物理力学参数结合隧道实际情况选取并进行相应的调整。

隧道开挖以 2m 为 1 步,每开挖一步紧接着施加相应的锚杆、拱架、衬砌,每开挖 3 个循环即 6m 进行一次 10m 超前导管施工,前后搭接长度为 4m,双侧壁导坑法纵向施工步距如图 4 所示,按照施工步距和开挖步设计开挖步骤,具体步骤不再赘述。

通过双侧壁导坑法计算模型对超前预加固措施及参数进行模拟,深入分析掌子面安全性评价(最大剪应变增量)、超前支护及洞身支护结构安全

表 3 城仔山隧道大型施工装备配置

Table 3 Large-scale construction equipment configuration of Chengzaishan Tunnel

装备名称	厂家	型号	结构尺寸/m			最大作业范围/m		
			长	宽	高	长	宽	高
挖掘机	卡特	320	8.30	3.10	5.70	—	—	9.84
湿喷机械手	耿立	GHP3015E	7.81	2.75	3.18	7.40	13.50	15.80
自行式液压仰拱栈桥	湖南中铁五新	YQS6-12-24m	38.10	5.60	1.70	—	—	—
一体化模板	成都鑫众拓	—	12.20	21.16	3.17	—	—	—
防水板自动铺挂台车	湖北晟鑫	—	8.00	20.40	9.70	—	—	—
智能二衬台车	湖北晟鑫	—	12.10	20.40	9.70	—	—	—
温控养护台车	智能工装	—	6.00	18.91	10.06	—	—	—
液压沟槽台车	自制	—	12.10	20.40	6.00	—	—	—
侧翻式装载机	龙工	ZL50NC	8.43	3.10	3.38	—	—	—
混凝土搅拌机	三一	412C-8S	9.79	2.525	3.98	—	—	—
自卸式出渣车	陕汽德龙	F3000	8.80	2.49	3.25	—	—	—

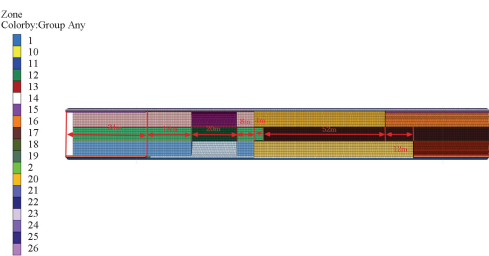


图 4 双侧壁导坑纵向施工步距

Fig. 4 Construction steps of double-sidewall pilot pit

性评价(超前支护应力、洞身支护结构位移、洞身支护结构应力)等,选取最佳的超前预加固措施及参数,分析结果如表 4 所示。通过图 3 所示的双侧壁导坑法计算模型对初期支护措施及参数、拱架锁脚措施及参数进行模拟,深入分析洞周围岩塑性特征、洞身支护结构安全性评价(洞身支护结构位移、洞身支护结构应力)两方面,选取最佳措施及参数。其中初期支护措施为喷射 C25 混凝土+ $\phi 50$ 注浆管和喷射 C30 混凝土+ $\phi 25$ 预应力锚杆 2 种,拱架锁脚措施及参数的比较内容为锁脚锚杆($\phi 22$ 药卷锚杆、 $\phi 32$ 自进式锚杆、 $\phi 50$ 注浆管)及采用不同长度(4, 6, 8m)的锁脚锚杆($\phi 50$ 注浆管),分析结果如表 5 所示,通过上述的模拟分析及比较设置出如表 6 所示的机械化施工支护参数。

3 机械化施工数值模拟分析

3.1 机械化施工安全评价

基于上述形成的施工方案,对施工过程中的掌子面、超前支护及洞身支护结构进行安全性评价(见表 7),模拟结果表明:整个施工过程均保持掌子面整体稳定,超前支护及洞身支护结构安全,施工步距满足现场施工安全要求。

表 5 措施方案比较

Table 5 Comparison of measures									
支护措施	喷射 C25 混凝土+ $\phi 50$ 注浆管	喷射 C30 混凝土+ $\phi 25$ 预应力锚杆	$\phi 22$ 药卷锚杆	$\phi 32$ 自进式锚杆	$\phi 50$ 注浆管	长 4m 锁脚锚杆	长 6m 锁脚锚杆	长 8m 锁脚锚杆	结果
洞周围岩塑性特征	未发展到地表	未发展到地表	未发展到地表	未发展到地表	未发展到地表	未发展到地表	未发展到地表	未发展到地表	差别较小
拱顶位移最大值/cm	0.562	0.547	0.554	0.536	0.515	0.617	0.509	0.515	安全
系统锚杆最大应力/MPa	5.20	30.51	29.50	29.80	30.20	27.10	30.40	30.20	安全
锁脚锚杆最大应力/MPa	153.10	150.44	307.01	220.48	135.55	47.77	159.34	135.55	安全
喷射混凝土拉应力最大值/MPa	0.08	0.06	0.03	0.04	0.04	0.15	0.04	0.04	安全
喷射混凝土压应力最大值/MPa	0.98	1.00	1.77	1.53	1.26	2.44	1.24	1.26	安全

表 4 超前预加固方案比较

Table 4 Comparison of advanced pre-reinforcement schemes

超前预加固措施	自进式 $\phi 76\times 6$ 中管棚	自进式 $\phi 51\times 8$ 中管棚
掌子面围岩剪应变增量	未形成破坏面	未形成破坏面
拱顶位移最大值/cm	0.88	0.88
系统锚杆最大应力值/MPa	365.0	365.1
超前管棚最大应力值/MPa	14.3	12.4
锁脚锚杆最大应力值/MPa	154.7	137.0
喷射混凝土拉应力最大值/MPa	2.04	2.01
喷射混凝土压应力最大值/MPa	6.38	6.37

表 6 机械化施工支护参数

Table 6 Support parameters of mechanized construction

序号	工序	参数
1	超前管棚	自进式 $\phi 51\times 8$ 中管棚
2	喷射混凝土	喷射 C30 混凝土
3	系统锚杆	$\phi 25$ 预应力锚杆
4	锁脚锚杆	8m 长 $\phi 50$ 注浆管

3.2 机械化施工力学分析

选择数值模型中纵向 20m 断面,提取支护结构位移、应力数据,分析机械化双侧壁导坑法支护结构施工力学特征。洞周位移随工序变化曲线如图 5 所示,由图 5 可知,拱顶随工序持续下沉,在拆除中隔壁及开挖弃渣施作仰拱二衬工序中,拱顶下沉速率加快。

在右导洞上台阶、左导洞上台阶、右导洞中台阶开挖后,上台阶水平收敛值急剧增大,之后随工序变化较小,在中导洞下台阶、拆除中隔壁、开挖弃渣施作仰拱二衬工序中,水平收敛值急剧减小。

表 7 双侧壁导坑法数值模拟计算结果

Table 7 Numerical simulation results of double-side wall guide pit method

围岩及 支护结构	施工阶段												评价
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
掌子面围岩剪应变增量	未形成破坏面												稳定
拱顶位移最大值/cm	0.161	0.177	0.192	0.195	0.195	0.195	0.351	0.372	0.394	0.411	0.451	0.462	安全
系统锚杆最大应力值/MPa	+5.05	+5.24	+5.51	+5.56	+5.63	+5.64	+7.17	+7.29	+7.42	+7.52	+7.89	+7.95	安全
超前管棚最大应力值/MPa	+7.53	-6.67	-7.20	-6.87	-7.29	-6.81	-7.63	-7.84	-8.05	-8.03	+7.89	+7.95	安全
锁脚锚杆最大应力值/MPa	41.49	42.54	43.99	44.67	45.22	45.33	50.95	52.00	53.20	54.04	55.65	55.89	安全
喷射混凝土拉应力最大值/MPa	+0.89	+0.89	+1.03	+1.08	+1.15	+1.15	+1.19	+1.20	+1.24	+1.26	+1.26	+1.27	安全
喷射混凝土压应力最大值/MPa	-3.03	-3.13	-3.19	-3.25	-3.31	-3.32	-5.59	-5.89	-6.19	-6.00	-6.06	-6.09	安全

注:表中“-”为受压,“+”为受拉;拱顶位移控制值为 5.0cm,系统锚杆、超前管棚、锁脚锚杆抗拉(压)强度控制值均为±400MPa,喷射混凝土抗拉、抗压强度控制值分别为 2.2,-20.0MPa; V_d 复合式衬砌考虑管棚和系统锚杆浆液扩散对围岩的加固效果

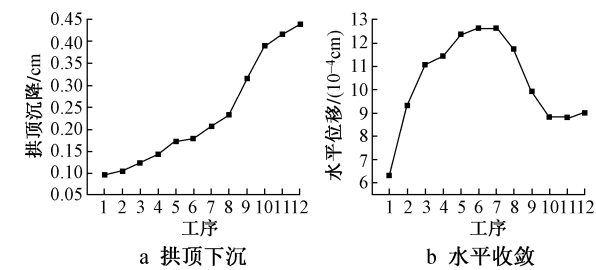


图 5 洞周位移随工序变化曲线

Fig. 5 Variation curve of displacement around the hole with the process

系统锚杆轴力随工序变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,在整个施工过程中,拱顶锚杆轴力最大,随工序变化较小;边墙锚杆轴力次之,随工序变化较小;左拱腰锚杆在左导坑上台阶开挖中轴力急剧减小。

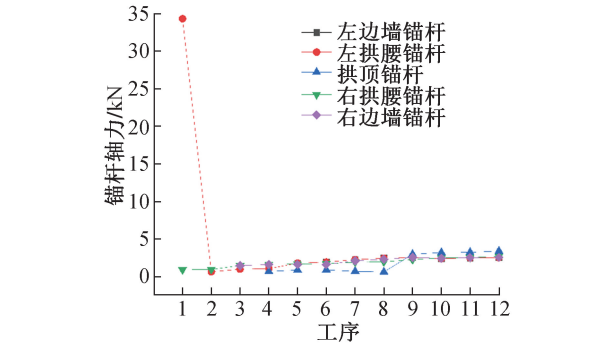


图 6 系统锚杆轴力随工序变化曲线

Fig. 6 Variation curve of the axial force of the system bolt with the process

锁脚锚杆应力随工序变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,锁脚拉应力较锁脚压应力小。对于最大拉应力值,中台阶锁脚锚杆较上台阶锁脚锚杆略大,故中导坑锁脚对钢架对内收缩有较强的控制作用;对于最大压应力值,上台阶锁脚锚杆较中台阶锁脚锚杆大,故上导坑锁脚对钢架对外收缩有较强的控制作用。

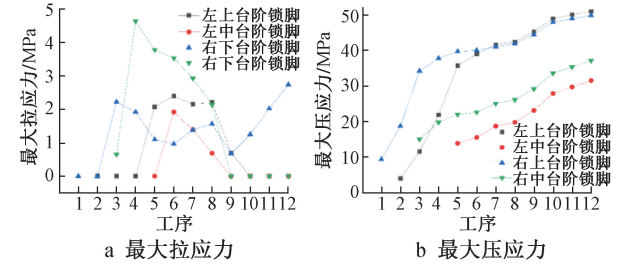


图 7 锁脚锚杆应力随工序变化曲线

Fig. 7 Variation curve of lock pin anchor stress with process

喷射混凝土应力随工序变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,整个施工过程中,喷射混凝土最大拉应力均位于拱顶,在左导坑中台阶开挖中,最大拉应力快速下降,后续工序持续增加;另一方面,喷射混凝土最大压应力均位于上台阶拱脚,随工序持续增大,弃渣回填和开挖弃渣时,喷射混凝土最大压应力有突变。

4 结语

综合数值模拟分析及现场实际情况来看,施工造成的应力、应变均在可接受范围内,针对广东省

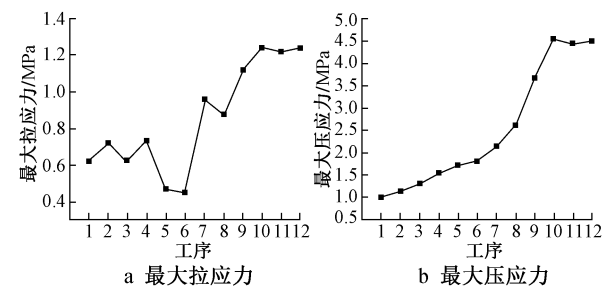


图 8 喷射混凝土应力随工序变化曲线

Fig. 8 Variation curve of shotcrete stress with process

常规工程地质条件的类似项目,提出的基于洞周岩性分布的超大跨隧道机械化施工工法设计体系合理,具有推广价值。但由于大跨度隧道建设工程结构、环境、施工方法的特殊性使得工程建设具有强烈的区域特性,上述提出的基于洞周岩性分布的超大跨隧道机械化施工工法设计体系是否适用于其他地域的大跨度隧道建设还有待进一步研究。此外,大型施工机械装备使用不够熟练,工序衔接不够紧密,有必要对现有的机械化施工工法、工艺进一步优化。

参考文献:

[1] 刘建友,吕刚,张民庆,等. 京张高铁八达岭长城站超大跨隧道开挖工法研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(S2):578-584.
LIU J Y, LÜ G, ZHANG M Q, et al. Research on excavation method of super-large span tunnel at Badaling Great Wall Station of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway[J]. Modern tunneling technology, 2019, 56(S2): 578-584.

[2] 吕刚,刘建友,张民庆,等. 京张高铁八达岭长城站超大跨隧道变形控制标准研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 34-39.
LÜ G, LIU J Y, ZHANG M Q, et al. Research on deformation control standard of super-large span tunnel at Badaling Great Wall Station of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway[J]. Railway standard design, 2020, 64(1): 34-39.

[3] 张民庆,吕刚,何志军,等. 八达岭长城站超大跨度隧道设计施工技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(3): 372-381.
ZHANG M Q, LÜ G, HE Z J, et al. Research on design and construction technology of super-large span tunnel at Badaling Great Wall Station[J]. Tunnel construction, 2018, 38(3): 372-381.

[4] 吕刚,刘建友,赵勇. 超大跨度隧道围岩支护体系构件化设计方法及其应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(9): 1520-1528.
LÜ G, LIU J Y, ZHAO Y. Design method and application of

rock and support system for super-large span tunnel[J]. Tunnel construction, 2018, 38(9): 1520-1528.

[5] 周祥,胡卫军,周东迎. 超大跨隧道特大塌方体的开挖技术探讨[J]. 西部交通科技, 2022(5): 138-140.
ZHOU X, HU W J, ZHOU D Y. Discussion on excavation technology of extra-large collapse of super-large span tunnel[J]. Western China communications science & technology, 2022(5): 138-140.

[6] 徐晓冬,刘杰,段彦福,等. 连霍高速杏花村 1 号大跨扁平超大断面隧道开挖方案研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12258-12264.
XU X D, LIU J, DUAN Y F, et al. Excavation scheme of the large-span flat and super-large section tunnel of Xinghua Lianhuo Expressway[J]. Science technology and engineering, 2023, 23(28): 12258-12264.

[7] 杨文涛,刘夏冰,贺少辉,等. 浅埋超大跨四线高铁隧道施工方法及开挖响应——以杭台高铁下北山 1 号隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S2): 381-388.
YANG W T, LIU X B, HE S H, et al. Construction method and excavation response of shallow buried super-large-span four-track high-speed railway tunnel: a case study of Xiabeishan No. 1 tunnel on Hangzhou-Taizhou high-speed railway[J]. Tunnel construction, 2022, 42(S2): 381-388.

[8] 邹翀,金星亮,高笑娟,等. 超大断面隧道双侧壁导坑法开挖步序优化[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 66-71, 119-120.
ZOU C, JIN X L, GAO X J, et al. Optimization of excavation step sequence of double side slope method in super section tunnel[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (natural science edition), 2017, 38(4): 66-71, 119-120.

[9] 梁淦波,杨宝锋,祝鑫. 深汕西改扩建工程超大跨公路隧道设计与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(S1): 301-310.
LIANG G B, YANG B F, ZHU X. Design and practice of super-large span tunnel for Shenzhen-Shantou western expressway extension project[J]. Tunnel construction, 2024, 44(S1): 301-310.

[10] 李佳旺. 郑万高铁大断面隧道机械化施工力学特性及支护参数优化研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
LI J W. Study on mechanical characteristic and supporting parameters optimization of mechanized construction of large section tunnel in Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[11] HE M C, SUI Q R, LI M N, et al. Compensation excavation method control for large deformation disaster of mountain soft rock tunnel[J]. International journal of mining science and technology, 2022, 32(5): 951-963.

[12] XU C B, QIN Y L. Study on identification of construction method for ultra-large-span tunnel[J]. Advances in civil engineering, 2020(1): 6625940.