

川藏铁路 3000 m 水平定向钻井技术方案

张恒春, 刘 广, 吴纪修, 王庆晓, 于好善, 刘志强, 许 洁

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:川藏铁路设计多条超长深埋隧道,且多处于高海拔、高陡斜坡及雪线以上的无人山区,地形险峻,起伏大,交通条件差。沿隧道轴线的水平定向钻井为隧道勘察提供了一种有效的勘察手段。结合工程及地层特点,从钻井设备、工艺等方面,为超长隧道勘察提供了一种 3000 m 级水平定向钻井技术方案。方案明确了井身结构、全面钻进和长钻程取心钻进工艺、钻井液措施及部分复杂情况应对措施。以较少的钻探工作量,为隧道勘察提供更加详细的实物地质资料,真实反映隧道内的地质情况。

关键词:隧道勘察;水平井;定向井;长钻程取心钻进;川藏铁路

中图分类号:P634.7;U452.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)11-0001-06

Technical plan for 3000m long horizontal directional drilling for Sichuan - Tibet Railway

ZHANG Hengchun, LIU Guang, WU Jixiu, WANG Qingxiao,

YU Haoshan, LIU Zhiqiang, XU Jie

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Many deep-buried super-long tunnels are designed for the Sichuan - Tibet Railway line, and most of them are located in high altitude, high steep slope and no-man mountain zones above the snow line, where the terrain is steep and undulating, and the traffic conditions are poor. Horizontal directional drilling along the tunnel axis provides an effective method for tunnel investigation. In view of the engineering and geological characteristics, this paper provides a 3000m capacity horizontal directional drilling plan for super-long tunnel investigation in terms of equipment and technology. The hole profile is specified in the plan together with full-face drilling and coring drilling technology, drilling fluid measures and some measures for complex situations. With less amount of drill work, the plan provides more detailed physical geological data for tunnel investigation, hence the true characterization of the geological conditions in the tunnel.

Key words: tunnel investigation; horizontal well; directional well; long-run core drilling; Sichuan - Tibet Railway

1 川藏铁路简况

川藏铁路起于成都铁路枢纽,向西经雅安、泸定、康定、新都桥、昌都、波密、林芝至拉萨,规划线路全长约 1800 km^[1]。川藏铁路是继青藏铁路之后,第二条进藏“天路”,是西部大通道的重要组成部分。全线隧道共计 198 座,总长 1223.45 km,占线路总长的 70%以上,特长隧道 46 座,长 724.44 km^[2]。线路“八起八伏”,累计爬升高度达 1.6 万多米,具有地形高差大、地灾规模大、构造活动强等显著特征^[3-5]。全线分 3 个路段进行推进:成都至雅安段、

拉萨至林芝段,雅安至林芝段,前 2 段分别于 2013 年和 2105 年开工建设^[6-7]。雅安至林芝段工程最为复杂,全线长约 1000 km,隧道占比约 90%以上,线路经过的地面最大高程约 5200 m,隧道最大埋深超过 2000 m,最大长度达 46.25 km^[8-10]。

雅安处于四川盆地西部边缘,以丘陵地貌形态为主;从雅安至康定,从四川盆地向青藏高原过渡,地势急剧隆升抬起,为高山峡谷地貌;康定之后处于高原之上,地貌形态以丘状高原及构造侵蚀形成的深切峡谷地貌为主^[11]。施工区域多处于高海拔、高

收稿日期:2020-09-17;修回日期:2020-10-15 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.11.001

基金项目:中国地质科学院勘探技术研究所科技资助项目“大直径孕镶金刚石取心钻头制备工艺研究”(编号:YB202003);中国地质调查局地质调查项目“冀中坳陷深部碳酸盐热储调查评价”(编号:DD20201103)、“苏皖赣地区页岩油气战略选区调查”(编号:DD20201171)

作者简介:张恒春,男,汉族,1987年生,硕士,主要从事取心钻探和深部钻探技术研究工作,河北省廊坊市金光道77号,zzhhcc2002@163.com。

引用格式:张恒春,刘广,吴纪修,等.川藏铁路 3000 m 水平定向钻井技术方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):1-6.

ZHANG Hengchun, LIU Guang, WU Jixiu, et al. Technical plan for 3000m long horizontal directional drilling for Sichuan - Tibet Railway[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):1-6.

陡斜坡及雪线以上的无人山区,山高谷深、雪山密布,隧道上方难以到达,结合特殊复杂的地质条件,隧道勘察采用水平定向(或小角度)钻探施工,施工地点多为人迹罕至的地方,不具备大型设备自行到达的通行条件。

2 沿线地质构造及地层岩性

川藏铁路在印度洋板块与欧亚板块碰撞而隆升的青藏高原地带绵延,沿线及其邻区地质环境条件极其复杂,构造运动强烈,地震频发,存在多条活动断裂带。川藏铁路横贯扬子地块、川滇地块、羌塘地块和拉萨地块4个一级大地构造单元,与喜马拉雅地块相邻。第四纪以来,印度板块向欧亚板块俯冲与挤压,致使青藏高原高程平均隆升3500~4000 m,印度板块目前仍以48~64 mm/a的速度向欧亚板块漂移和俯冲,是青藏高原以9.5 mm/a的速度快速隆升的主动力,由此形成强烈的现代地壳活动和高地应力场,在地壳东向运动不均匀部位形成不同方向的活动断裂带。其中,较大型的断裂达54条之多,具有一定规模的区域性活动断裂带达17条,如鲜水河断裂带、巴颜喀拉断裂带、龙门山断裂带、安宁河断裂带等^[3,11]。

地层岩性分布受地质构造控制作用明显,以沉积岩为主,在侏罗系、三叠系、二叠系、石炭系等地层中有侵入花岗岩,同时零星分布变质岩。年轻沉积岩分布于断陷盆地、河流阶地及河谷内,岩性以冲洪积、冰碛物、湖相、砂页岩为主;年代较老的沉积岩以砂砾岩、砂泥岩、砂页岩、灰岩为主。变质岩以砂板岩、片岩、变粒岩、片麻岩和大理岩为主。侵入岩体以花岗岩类、闪长岩类、斑岩类为主,属坚硬岩组,分布较广^[3,12]。取出的岩心照片见图1。



图1 某隧道勘察岩心

Fig.1 Cores from a tunnel investigation project

3 水平定向井的优势和难点

3.1 技术优势

笔者与铁路设计单位进行技术交流,设计单位希望能实施2500~3000 m的水平井,采用对向施工的方式,可完成5~6 km的隧道全水平井勘察,具有较高的经济意义和实用价值。水平定向井用于铁路隧道工程勘察如图2所示。在山高谷深、雪山密布,隧道上方难以到达的地区,如果采用垂直钻孔取心,不但工作难以开展,而且取心工作量增加了数十倍,在岩心分析时,真正反映隧道穿越区域地质特性的有效信息量并不大^[13]。若采用基于水平定向钻探的勘察技术,可在隧道傍山段或沟谷内布置钻孔,利用定向钻探技术钻至隧道洞身附近,获得目标地层岩心,既避免了因修路、设备搬迁等对脆弱环境造成的破坏,又解决了高海拔不易施工的问题,施工长距离水平井可以解决在一个施工地点代替多个垂直孔施工所能达到的效果,且水平井的轨迹沿隧道走向,确保了钻探勘察资料的翔实性,更能真实反映该隧道内的地质情况,为隧道选址及后续隧道施工提供详细的实物地质资料。

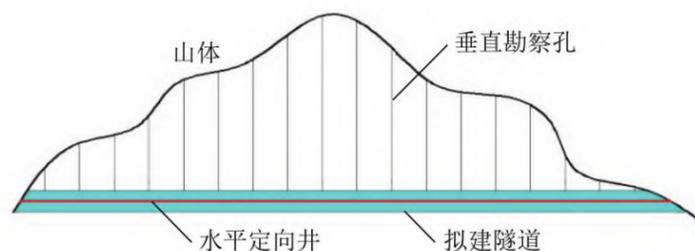


图2 隧道勘察水平取心和垂直取心对比

Fig.2 Comparison of horizontal coring and vertical coring for tunnel investigation

3.2 技术难点

(1)近水平开孔,且长距离水平钻井,建立钻井液循环时对钻井设备和固控设备有特殊要求,需要对相关设备进行适当改装。

(2)作业区地层破碎,涌水严重,全井段水平井,不能靠钻井液密度平衡地层压力,钻井护壁难度大,有井内掉块、坍塌的风险。

(3)全井段水平井,不能靠井底加重钻具施加钻压,且井内钻具与井壁摩阻大,钻机施加的钻压很难传递到钻头上,特别是使用牙轮钻头,没有足够的钻压会严重影响钻进效率。

(4)长距离水平井,套管作业时,套管与井壁摩阻大,套管下入困难。

(5)花岗岩研磨性强,可钻性差,机械钻速低,直井常规钻进时效1.0~1.5 m/h,水平井效率更低,钻井周期将大幅度增加,提高工程成本。

4 施工方案

4.1 钻井设备

川藏铁路地层复杂,欲完成 3000 m 水平钻井,对钻井设备有一定要求:

(1)川藏铁路施工环境复杂,3000 m 级的钻机设备体积、自重大,应采用模块化设计,满足运输要求,同时还应易于现场组装。

(2)考虑高原地区氧气稀薄,设备动力应充足,钻机动力头转速、扭矩、提升力、给进力等要满足高原地区 3000 m 级水平定向取心及全面钻进需求。

(3)钻机设备应具备高效施工能力,结合施工实际,针对不同的工况实现顶进(提升)能力与速度的最优功率匹配,即实现非工作状态下的快速提升或高速顶进,从而大大减少起下钻时间。同时设计行程满足使用长钻杆要求,节省上、卸扣频次,提高钻进效率。

(4)具有较高的机械化、自动化水平,易于操作和维修,在川藏铁路恶劣的自然环境条件下能降低

工人劳动强度,节省人工成本。

(5)应具有较强的事故处理能力,具备全地层钻进能力,且满足水平下套管等作业要求。

基于上述要求,拟采用我所针对川藏铁路长距离水平井研制的大功率水平定向钻机作为此项目的工程施工设备,如图 3 所示。该设备能力强大,钻机顶进、提升功能采用马达-减速机驱动齿轮/齿条结构;钻机动力头回转功能采用马达-减速机驱动回转齿轮箱结构。性能参数详见表 1。施工中也可选择类似或更优性能的其它钻机。



图 3 水平定向钻机

Fig.3 Horizontal directional drill rig

表 1 水平定向钻机参数

Table 1 Parameters of the horizontal directional drill rig

主机功率/ kW	最大提升(给进)力/ kN	最大提升(给进)速度/ (m·min ⁻¹)	最大扭矩/ (N·m)	最大转速/ (r·min ⁻¹)	钻杆规格/ mm	动力头行程/ m	钻塔角度/ (°)
559	3000	30	60000	200	Ø127×9600	11.5	0~18

4.2 井身结构及施工程序

根据工区地层特点、地层压力情况及钻井工艺技术状况,依据有利于安全、优质、高效钻井和取准、取全地质资料的原则进行井身结构设计。本井采用二开完井井身结构(见图 4),孔口管下至基岩以下 5 m,一开 Ø215.9 mm,封割主要破碎带,二开 Ø152.4 mm 钻至完井井深。若 Ø152.4 mm 井段

钻遇涌水、强破碎等复杂地层,则使用膨胀套管封割等技术处理。

钻井施工程序:

(1)开孔 Ø311.2 mm 的牙轮钻头钻至井深 20~30 m,Ø244.5 mm×7.92 mm 孔口管下至井底。

(2)一开 Ø215.9 mm 的钻头钻至 1800 m(钻穿复杂井段)设计井深,并按勘察要求取心。方案 1:Ø215.9 mm 牙轮钻头全面钻进 90 m,提钻更换取心钻具,取心钻进 10 m,依次循环,完成本开次钻井工作。方案 2:Ø215.9 mm 牙轮钻头全面钻进(软地层),钻遇坚硬地层,换长钻程取心钻具取心钻进,获取更多岩心资料的同时,提高机械钻速。下 Ø177.8 mm×9.19 mm 直连套管,封割主破碎带。

(3)二开 Ø152.4 mm 的钻头钻至设计井深 3000 m 完井,并按勘察要求取心。方案 1:Ø152.4 mm 牙轮钻头全面钻进 90 m,提钻更换取心钻具,取心钻进 10 m,依次循环,完成本开次钻井工作。方案 2:Ø152.4 mm 牙轮钻头全面钻进(软地层),钻遇坚硬地层,换长钻程取心钻具取心钻进,获取更

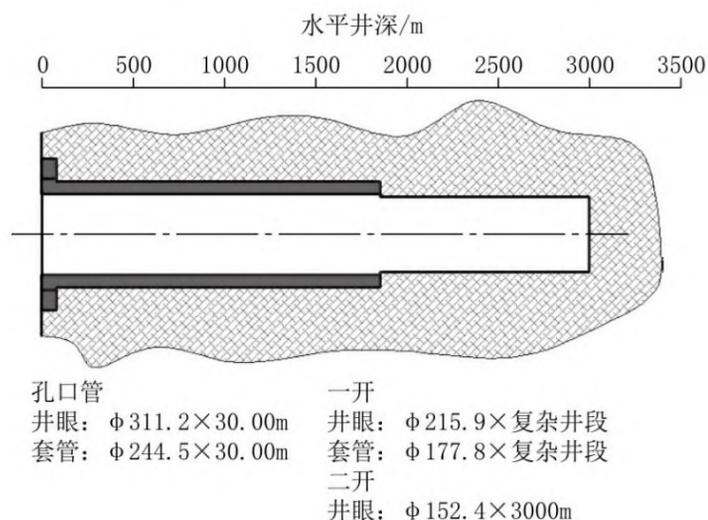


图 4 井身结构

Fig.4 Hole profile

多岩心资料的同时,提高机械钻速。

(4)二开 $\text{O}152.4$ mm 井段钻遇复杂地层,用膨胀套管技术或旋喷技术处理,直至完井。

4.3 钻井工艺

4.3.1 钻井工艺选择

目前为达到地质勘察的目的,对于取心而言有2种方法:全孔取心和间断取心。全孔取心最能直接反映地质情况,所获取的地质信息最全。但在本工程中采取间断取心和岩屑录井相结合的方法也能满足工程需要,设计取心间距为100 m,也可根据项目要求及物探的异常进行加密及加大间距。

工程以全面钻进为主,并根据施工中的具体情况来决定采取具体取心间隔。全面钻进以井底动力(螺杆钻具)驱动牙轮钻头复合钻进为主。钻遇极坚硬地层时采用“涡轮钻具驱动金刚石钻头”复合钻进,利用涡轮钻具的高转速特性进行高效碎岩;或采用“螺杆钻具+液动锤”二合一复合钻进,增加冲击载荷,提高碎岩效率。取心钻进以大直径长钻程取心为主,一般地层采用“螺杆钻具+顶驱”复合驱动取心钻具,极坚硬地层采用“涡轮钻具+顶驱”复合驱动取心钻具。取心钻具岩心容纳量应尽可能长。

4.3.2 全面钻进

硬岩钻进中,“井段动力+顶驱(或转盘)”复合钻进是被证明了的有效碎岩方式。在青海共和干热岩钻井中,花岗岩地层,螺杆钻具+转盘驱动牙轮钻头可获得3 m/h以上的机械钻速,复合钻进井底动力工具选择小角度单弯螺杆。单弯螺杆为动力的复合钻进,是有效的防斜打直工艺措施,同时配套定向仪器使用,可随时纠斜,有效控制井眼轨迹^[14]。弯螺杆复合钻进可获得较大的井眼扩大率,有效降

低因缩径造成的摩阻增大、卡钻等风险。

钻具组合如下,具体可根据现场使用情况进行调整。

开孔: $\text{O}311.2$ mm 钻头+ $\text{O}127$ mm 外平钻杆;
一开: $\text{O}215.9$ mm 钻头+ $\text{O}212$ mm 稳定器+ $\text{O}172$ mm 单弯螺杆+ $\text{O}165$ mm 水力加压器+ $\text{O}212$ mm 稳定器+ $\text{O}127$ mm 外平钻杆;

二开: $\text{O}152.4$ mm 钻头+ $\text{O}148$ mm 稳定器+ $\text{O}127$ mm 单弯螺杆+ $\text{O}121$ mm 水力加压器+ $\text{O}148$ mm 稳定器+ $\text{O}127$ mm 外平钻杆。

钻进参数:综合钻头尺寸、井底动力钻具类型、地层情况等合理选择钻进参数,基本钻进参数如表2所示。

表2 全面钻进基本参数
Table 2 Full-face drilling parameters

开次	井底动力工具	井径/mm	钻头类型	钻井液排量/(L·s ⁻¹)	钻压/kN	顶驱转速/(r·min ⁻¹)
开孔		311.2	牙轮钻头	35~60	140~300	60~140
		215.9	牙轮钻头	32~40	100~200	80~140
一开	螺杆钻具	215.9	牙轮钻头	25~35	80~150	10~30
	涡轮钻具	215.9	金刚石钻头	30~40	40~120	10~30
二开	螺杆钻具	152.4	牙轮钻头	15~25	60~160	80~140
	涡轮钻具	152.4	金刚石钻头	15~25	30~80	10~30

4.3.3 取心钻进

大直径长钻程取心技术是在松科二井成熟应用的一种高效提钻取心方式,配以合适的取心钻头和井底动力工具可以获得较理想的钻进效率^[15]。本工程延续该技术思路,采用长钻程取心技术完成取心工作,钻具结构如图5所示^[16],钻具参数如表3所示,取心钻进参数如表4所示。

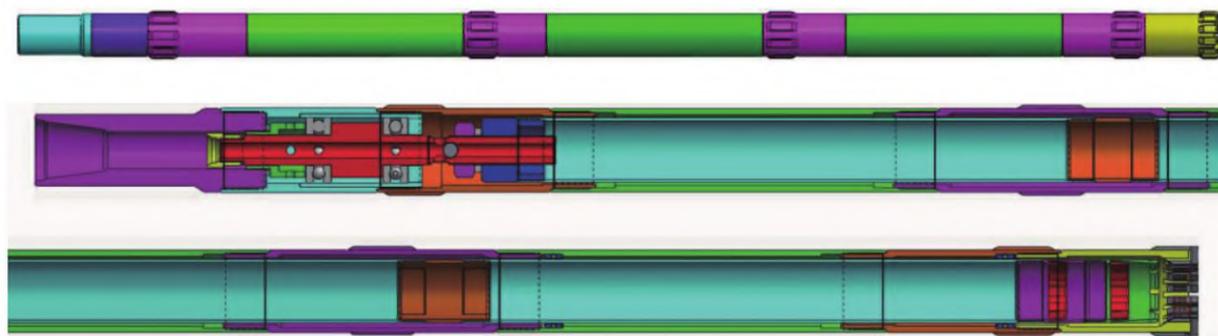


图5 长钻程取心钻具结构示意图

Fig.5 Structure of the long-run core drilling tool

4.3.4 定向钻进

4.3.4.1 纠斜工具

工作区域岩石可能是抗压强度较高的花岗岩,

纠斜工具不但应满足硬岩纠斜钻进的施工还应能在深孔和硬岩地层实现高效和安全钻进,因此应选择大扭矩和大功率螺杆钻具。在 $\text{O}215.9$ mm井眼中

表 3 取心钻具技术参数

Table 3 Technical parameters of the coring tool

开次	钻具型号	外管直径/mm	钻头直径/mm	岩心直径/mm	岩心容纳量/mm	备注
	KT194	194	215	124	10~40	
一开	KT178	178	215	110	10~40	备用
	KT194T	194	215	160	10~40	单管
二开	KT140	140	152	92	10~40	
	KT140T	140	152	116	10~40	单管

表 4 取心钻进参数

Table 4 Core-drilling parameters

开次	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	钻井液排量/(L·s ⁻¹)
一开	20~80	10~20(+Ø172 mm 直螺杆)	22~30
二开	10~15	10~20(+Ø127 mm 直螺杆)	12~16

表 5 螺杆钻具技术参数

Table 5 Technical parameters of the PDM drill

开次	螺杆直径/mm	头数	级数	扭矩/(N·m)	功率/kW	转速/(r·min ⁻¹)	推荐钻压/kN	螺杆弯角/(°)
一开	172	5:6	6	6240	142	78~154	100	0.75~1.25
二开	127	7:8	4	2468	75	130~260	49	0.75~1.25

表 6 LHE6201 型测斜仪技术参数

Table 6 Technical parameters of LHE6201 inclinometer (°)

参数	倾斜角	方位角	高边工具面角	磁性工具面角
测量范围	0~180	0~360	0~360	0~360
测量精度	±0.1	±1.0	±0.5	±0.5

驱不转动,钻具组合如下。

一开:Ø215.9 mm 钻头+Ø210 mm 稳定器+Ø172 mm 单弯螺杆+Ø165 mm 水力加压器+定向接头+Ø127 mm 无磁承压钻杆×1 根+Ø127 mm 外平钻杆。

二开:Ø152.4 mm 钻头+Ø148 mm 稳定器+Ø127 mm 单弯螺杆+Ø121 mm 水力加压器+定向接头+Ø127 mm 无磁承压钻杆×1 根+Ø127 mm 外平钻杆。

4.4 钻井液措施

4.4.1 钻井液难点分析

(1)全水平井施工,特别是停泵时,岩屑在钻井液中下滑至井壁,容易在下井壁形成岩屑垫,会导致摩阻和扭矩增加,增大卡钻风险,影响下套管和固井作业,需要足够的切力悬浮岩屑,这对钻井液的流变性提出更高的要求。

(2)工作区域地层破碎,井壁易失稳,对钻井液的防塌封堵性能提出更高的要求。

钻进时,宜采用 Ø172 mm 口径的单弯螺杆;在 Ø152.4 mm 井眼中钻进时,宜采用 Ø127 mm 口径的单弯螺杆,与外平钻杆外径保持一致。螺杆技术参数如表 5 所示。

4.3.4.2 随钻测量仪器

泥浆脉冲式无线随钻测斜仪(MWD)是目前最常用的定向井测量仪器,具备钻孔测量和钻具定向双重功能。目前成熟产品很多,技术参数相近。本工程选择 LHE6201 型泥浆脉冲式无线随钻测斜仪,该仪器探管外径 40 mm,电池工作时间长达 180 h,测量精度如表 6 所示。

4.3.4.3 钻进参数及钻具组合

定向钻进参数与全面钻进类似,定向钻进时顶

(3)钻柱在重力作用下与井壁的接触面积远大于直井,钻具的摩阻也会大幅度增加,对钻井液的润滑性能提出更高的要求^[17-18]。

4.4.2 钻井液技术措施

井眼净化:漏斗粘度 60~65 s,保持钻井液动切力 6~12 Pa,初切力 3~6 Pa,终切力 6~12 Pa,使钻井液具有良好的携砂性能。

井壁稳定:根据破碎性岩层的特性,分析失稳机理,配合使用不同类型的封堵剂,含量≤5%,确保形成良好的泥饼,在井壁上形成致密的封堵层;保持钻井液失水量≤3 mL/30 min,减少滤液进入裂缝,引发井壁失稳。

降摩阻:优选液体润滑剂,与球型弹性石墨或玻璃微珠配合使用,降低摩阻系数。摩阻系数控制在 0.08~0.1。

4.4.3 建议配方

钻井液配方建议如下,使用过程中根据实际情况进行调整。

2%~3%膨润土+0.3%NaOH+0.3%PAC-LV+1%~2%流型稳定剂+封堵剂(2%~3%乳化沥青+1%~2%超细碳酸钙+2%成膜封堵剂)+5%~10%聚酰胺树脂类润滑剂+1%~2%超细石墨+3%~6%有机盐。

5 结语

(1)川藏铁路超长深埋隧道众多,沿隧道轴线的水平定向钻井为隧道勘察提供了一种高效的手段。

(2)3000 m 水平定向钻井技术方案,为超长隧道勘察量身打造,以较少的钻探工作量,为隧道勘察提供更加详细的实物地质资料,更能真实反映该隧道内的地质情况。

(3)钻井施工方案从设备、工艺等方面进行论述,实施过程中需结合现场实钻情况进行及时调整。

参考文献(References):

- [1] 川藏铁路工程介绍[J].隧道与地下工程灾害防治,2019,1(1):110.
Introduction to Sichuan - Tibet Railway Project[J]. Hazard Control in Tunneling and Underground Engineering, 2019,1(1):100.
- [2] 郑宗溪,孙其清.川藏铁路隧道工程[J].隧道建设,2017,37(8):1049-1054.
ZHENG Zongxi, SUN Qiqing. Tunnelling of Sichuan - Tibet Railway[J]. Tunnel Construction, 2017,37(8):1049-1054.
- [3] 郭长宝,张永双,蒋良文,等.川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J].现代地质,2017,31(5):877-889.
GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, JIANG Liangwen, et al. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan - Tibet Railway and its adjacent area[J]. Geoscience, 2017,31(5):877-889.
- [4] 刘金松.川藏铁路高地温隧道施工关键技术研究[J].施工技术,2018,47(1):100-102.
LIU Jinsong. Key construction technologies research on high geothermal tunnel of Sichuan - Tibet Railway[J]. Construction Technology, 2018,47(1):100-102.
- [5] 冯涛,蒋良文,张广泽,等.川藏铁路雅康段隧道水热害评估方法探讨[J].铁道工程学报,2016,33(5):12-17.
FENG Tao, JIANG Liangwen, ZHANG Guangze, et al. Discussion about estimation technique of tunnel thermal harm in Yaan - Kangding section of the Sichuan - Tibet Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016,33(5):12-17.
- [6] 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等.川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):445-468.
XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan - Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39(3):445-468.
- [7] 唐秋宇,张锦.川藏铁路雅林段工程施工质量风险研究[J].中国安全科学学报,2020,30(5):101-107.
TANG Qiuyu, ZHANG Jin. Research on construction quality risk of Yalin section of Sichuan - Tibet Railway[J]. China Safety Science Journal, 2020,30(5):101-107.
- [8] 王成虎,高桂云,杨树新,等.基于中国西部构造应力分区的川藏铁路沿线地应力的状态分析与预估[J].岩石力学与工程学报,2019,38(11):2242-2253.
WANG Chenghu, GAO Guiyun, YANG Shuxin, et al. Analysis and prediction of stress fields of Sichuan - Tibet Railway area based on contemporary tectonic stress field zoning in Western China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(11):2242-2253.
- [9] 马辉,高明忠.基于系统工程方法论的川藏铁路隧道工程建设管理探讨[J].现代隧道技术,2020,57(3):1-8.
MA Hui, GAO Mingzhong. Discussion on the construction management of Sichuan - Tibet Railway tunnel based on system engineering methodology[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020,57(3):1-8.
- [10] 李坚.航空电磁法在川藏铁路隧道勘探中的应用[J].铁道工程学报,2020,37(4):1-5.
LI Jian. Application of airborne electromagnetic method in tunnel exploration in Sichuan - Tibet Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020,37(4):1-5.
- [11] 宋章,张广泽,蒋良文,等.川藏铁路主要地质灾害特征及地质选线探析[J].铁道标准设计,2016,60(1):14-19.
SONG Zhang, ZHANG Guangze, JIANG Liangwen, et al. Analysis of the characteristics of major geological disasters and geological alignment of Sichuan - Tibet Railway[J]. Railway Standard Design, 2016,60(1):14-19.
- [12] 杨德宏.川藏铁路昌都至林芝段主要工程地质问题分析[J].铁道标准设计,2019,63(9):16-22,27.
YANG Dehong. Analysis of main engineering geological problems in Chengdu - Linzhi section of Sichuan - Tibet Railway[J]. Railway Standard Design, 2019,63(9):16-22,27.
- [13] 向军文,陈晓林,胡汉月.定向造斜及水平钻进连续取心技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):33-36.
XIANG Junwen, CHEN Xiaolin, HU Hanyue. Continuous coring technology in inclination drilling & horizontal drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007,34(9):33-36.
- [14] 陈炜卿,孙海芳,陈大祺,等.单弯双稳钻具旋转钻进防斜打直效果分析[J].钻采工艺,2013,36(3):13-16,4.
CHEN Weiqing, SUN Haifang, CHEN Daqi, et al. Analysis of anti-deflect and hole-straightening effects of a slide steering assembly under rotary drilling mode[J]. Drilling & Production Technology, 2013,36(3):13-16,4.
- [15] 朱永宜,王稳石,张恒春,等.我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系[J].地质学报,2018,92(10):1971-1984.
ZHU Yongyi, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, et al. Implementation overview of Chinese Continental Scientific Drilling(CCSSD) project and technical systems of core boring[J]. Acta Geologica Sinica, 2018,92(10):1971-1984.
- [16] ZHU Yongyi, WANG Wenshi, WU Xiaoming, et al. Main technical innovations of Songke Well No.2 Drilling Project[J]. China Geology, 2018,1(2):187-201.
- [17] 李永耀,李国荣,罗红芳,等.延长陆相页岩气水平井提速技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):9-15.
LI Yongyao, LI Guorong, LUO Hongfang, et al. Study on the technology of improving the mechanical drilling speed of horizontal wells for terrestrial shale gas[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):9-15.
- [18] 祁斌,刘蒙蒙.乌鲁木齐矿区大倾角地层煤层气水平井技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(10):27-33.
QI Bin, LIU Mengmeng. Technical study on horizontal coal-bed methane wells in high dip strata in the Urumqi Mining Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(10):27-33.

(编辑 周红军)