

基于工序需求的隧道机械化施工安全步距确定

许王亮

(中铁北京工程局集团第一工程有限公司 陕西 西安 710100)

摘要: 高风险隧道的施工工期长、风险高,为加快施工进度、降低施工的风险,采用大型机械取代人工,达到以机械减人、换人,改善施工环境,提供施工效率是目前隧道施工发展的方向。本文以“乐山—西昌”高速公路“马边—昭觉”路段的在建大凉山隧道洞口工程为工程背景,在分析工程施工重难点基础上,基于目前国内施工采用的机械,提出了大凉山 1[#] 隧道大型机械化施工的机械选型;基于对隧道施工工艺的分析,提出大型机械化施工隧道合理的安全步距,指导隧道的机械配置及施工,取得了良好的效果。通过大凉山隧道大型工装的应用,在保证初支稳定的状态下,实现以机械化换人、智能化减人的目标,有效提高工效的目的,减少安全风险。

关键词: 隧道工程; 机械化配套; 施工安全步距

1 依托工程概况

1.1 工程概况

“乐山—西昌”高速公路地处四川省以南的乐山市和凉山州境内,横贯了乌蒙山特困地区和大小凉山彝族聚居区,是四川省重要的扶贫通道。该条公路设施的建设扩充了四川省高速公路网的战略布局,同时也推动了大小凉山贫困地区脱贫攻坚的步伐。“乐山—西昌”高速公路“马边—昭觉”路段在建控制性工程大凉山隧道施工 K1 标段的 1 号隧道,地处于四川省雷波县大谷堆乡,隧道设计类型为双向分离式越岭隧道。左洞进口桩号 ZK73+594,分界里程桩号 ZK80+500,全长 6906m。右洞进口桩号 K73+643,分界里程桩号 K80+500,全长 6852m。平导进口桩号为 PDK73+618,贯通里程为 PDK78+240 全长 4622m。隧道长度大,穿越地层众多,岩性多,构造复杂,不良地质主要为岩溶、不良气体、膨胀软岩。该工程的施工组织难度和施工安全风险是本标段隧道工程的重点、难点技术攻关问题。

1.2 工程地质

大凉山 1 号隧道工程所处地理位置地势陡峻,属构造侵蚀深切高山区。隧址区属侵蚀构造高山地貌,地貌基本形态主要受地质构造控制,并与地层岩性密切相关。隧道进口处斜坡坡度一般呈 15°~25° 方向,植被多以松树及杂木为主。隧道出口处斜坡陡缓相接,坡度一般 15°~20° 方向,局部陡坎高 1~3m,覆盖层厚度大,植被稀少,多为荒地。乐西高速路线走廊带内出露地层除缺失元古界前震旦系,震旦系及晚古生界泥盆系、石炭系外,其余从寒武系到第四系均有出露。其中寒武

系为早期砂泥岩、中晚期碳酸岩夹砂泥岩,奥陶系为早期砂页岩,志留系为砂页岩夹灰岩,二叠系为早期的巨厚灰岩到晚期的峨眉山玄武岩;三叠系为早期的砂页岩到中期的砂页岩夹灰岩至晚期的含煤砂页岩,侏罗系及白垩系则主要为砂页岩沉积;第四系为松散砂砾、粘土等沉积。隧道区穿越地层众多,岩性多,构造复杂,不良地质主要为碳酸岩岩溶、煤系地层瓦斯问题。

1.3 施工安排

主洞进口端及平导均采用正常钻爆法作业,为加快施工进度,施工中拟采用大型机械化施工。施工准备 3 个月,3 个月后各钻爆工作面进洞施工。隧道施工开挖分为 3 个阶段,具体如下。

第一阶段:3 组施工队分别施工隧道左、右、平导洞;主洞以左洞为例,主洞进尺 1752m,用时 21 个月,平均月进尺 86m,施工至 ZK75+395 处,隧道剩余 5105m;平导平均月进尺 108m,用时 21 个月,进尺 2252m,施工至 PDK75+870 处,平导剩余 2370m。

第二阶段:主洞平均月进尺 110m,用时 17 个月(总用时 38 个月),隧道进尺 1870m,施工至 ZK77+265 处,累计进尺 3671m,隧道剩余 3235m。平导平均月进尺 140m,用时 17 个月(总用时 38 个月),进尺 2370m,施工至分界里程 PD78+240 处,累计进尺 4622m,平导贯通;为满足平导辅助施工通行条件,10[#]、11[#] 人行横通道断面采用车行横通道断面,实际施工过程中,根据施工进度,进一步核实和调整迂回通道的位置。10[#] 人行横通道至 PDK78+240 段平导断面为 TBM 预备洞断面(至本标段终点长 430m),为拆卸 TBM 设备做准备。迂回通道(图 1)形成后,开始施工 TBM 拆卸洞,位于

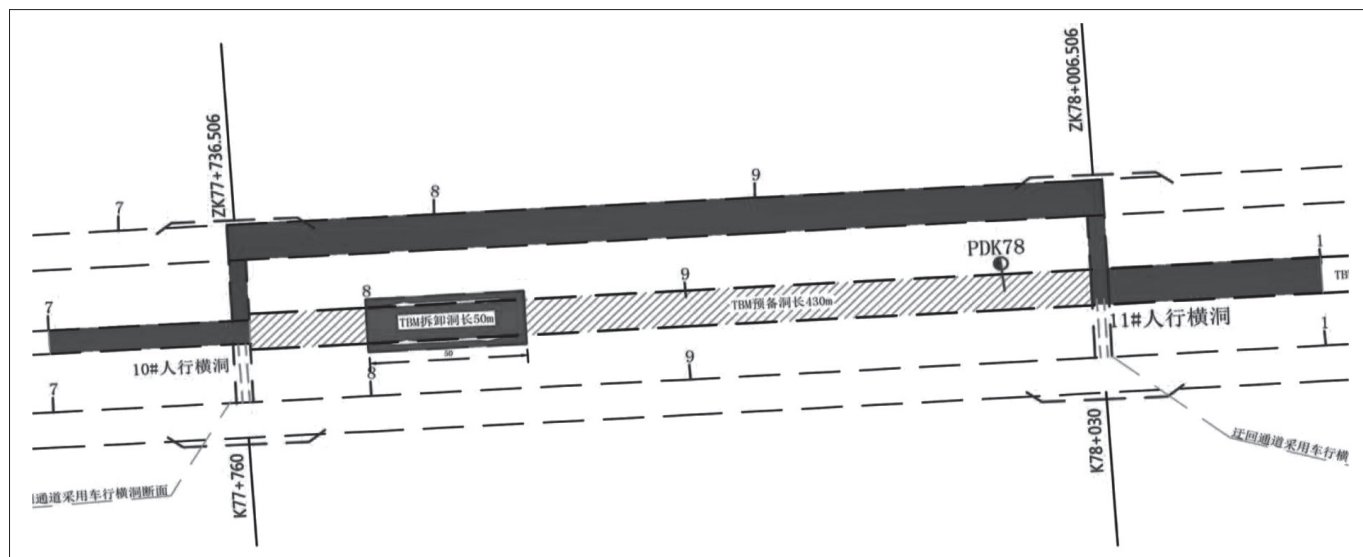


图1 迂回通道示意图

10#人行横通道附近平导内,长50m。平导形成贯通通道后,平导具备新增工作面辅助主洞施工的条件。

第三阶段:主洞继续向大里程掘进795m,施工至ZK78+330处(1#多功能转化带),平均月进尺100m,用时8个月,总计用时46个月。同步由ZK78+330(1#多功能转化带)增加工作面向大里程掘进650m,施工至ZK78+980处平均月进尺100m,用时8个月,总计用时47个月。同时由8#车通增加工作面向小里程施工至ZK78+980处,掘进1100m,平均月进尺100m,用时11个月,总计用时51个月。第一步完成后,由8#车通向大里程施工,掘进420m,月均105m,用时4个月,总用时52个月,左线贯通。

2 隧道机械化施工配套方案

2.1 机械化施工方案

机械化配套工装施工,安全步距若按照原有规定,大型机械化施工将难以发挥作用(原安全步距要求:Ⅴ级围岩仰拱40m,二衬70m,Ⅳ级围岩仰拱50m,二衬90m)。考虑爆破后飞石的距离在30~50m之间,台架长8m,三臂凿岩台车长18m,湿喷机械手车长11.2m,设备安全距离6m,仰拱液压栈桥48m,掌子面距离仰拱要保证80~100m,方可采用大型设备进行全断面施工。根据现场的实际施工情况,建议掌子面一次开挖1m,仰拱距掌子面安全步距控制在

80m内;掌子面一次开挖2m,仰拱距掌子面安全步距控制在90m内;掌子面一次开挖3m,仰拱距掌子面安全步距控制在100m内(掌子面开挖进尺和飞石距离成比例关系)。二衬台车长12m,自行车式防水板铺挂台车7m,防水板台车与二衬台车之间的距离30m,考虑到大型设备上栈桥的距离30m、设备安全距离20m,掌子面距离二衬要保证180~200m,方可采用大型设备进行全断面施工。根据现场的实际施工情况,建议掌子面一次开挖1m,二衬距掌子面安全步距控制在180m内;掌子面一次开挖2m,二衬距掌子面安全步距控制在190m内;掌子面一次开挖3m,二衬距掌子面安全步距控制在200m内(掌子面开挖进尺和飞石距离成比例关系)。隧道在使用大型工装设备施工情况下,掌子面快速施工,仰拱一次施工5m难以满足安全步距要求及机械化配套施工要求,为加快仰拱施工进度,支护结构尽早闭合成环,缩减仰拱至掌子面的距离,有效降低安全风险,因此将仰拱一次开挖长度控制在6m或12m内。

2.2 大型机械工装设备

大凉山隧道采用大型机械工装施工,如图2所示,

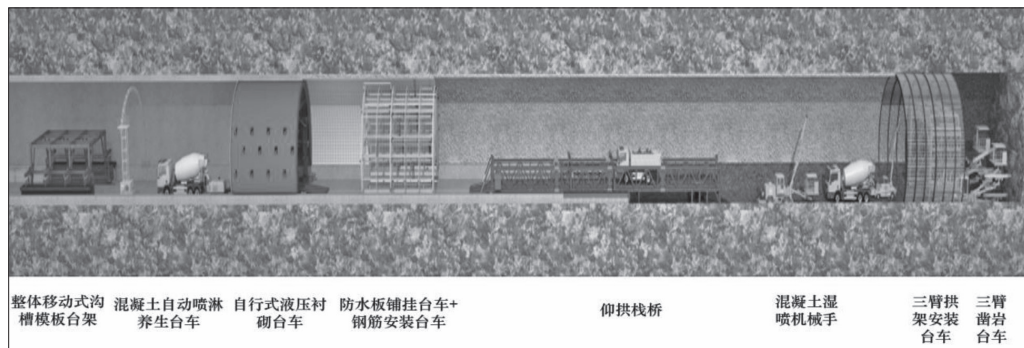


图2 流水线机械配置

所使用的机械设备主要包括三臂凿岩台车、混凝土喷射台车、拱架安装台车、防水板铺挂台车及二衬台车等。

(1) 三臂凿岩台车：段凿岩台车采用的是由铁建重工出品的 ZYS113 三臂凿岩台车，该设备是专门设计用于隧道钻孔，由 Bever Control 系统控制，能保证台车按照事先规划的钻孔方案进行精确地、系统地钻孔。该设备工作范围为 $11.3\text{m} \times 16\text{m}$ 。现场设备如图 3 所示。



图 3 三臂凿岩台车

(2) 拱架安装台车：拱架安装台车一般适用于各种断面的大中型隧道，通过对钢拱架的抓取、空中运送、对接、连接、卸载拱架等动作实现在湿喷混凝土前对钢拱架的安装支护。该设备具备了远程操控技术，从而实现了机器自动安装功能，降低了人工成本，提高了施工速度。拱架安装采用的是由铁建重工出品的 SCD133 隧道多功能作业台车，最大作业高度 13m，最大作业半径 8m；额定载重：中臂 1.5t，左右臂 0.7t，回转角度 180° ；臂架 2 级伸缩，最大伸缩量 6210mm，最大滑



图 4 拱架安装台车

移量 3200mm。该设备属于隧道支护结构安装设备，在公路铁路、地下隧道和冶金工程等领域得到广泛应用。现场设备如图 4 所示。

(3) 混凝土喷射台车：混凝土喷射机械手利用高压空气进行喷射混凝土，是智能化的混凝土喷射装备，理论喷射排量可达 30 方/h，被广泛应用于隧道全断面施工、道路边坡、地下工程等各种领域的混凝土喷射支护作业。隧道的混凝土喷射采用铁建重工出品的 HPS3016S 混凝土喷射台车，总机重量 17.4t，柴油机功率 75kW，电机功率 55kW，理论输送 30 方/h。该设备是针对隧道机械化施工开发的集行走、泵送和喷射功能于一体的隧道混凝土喷射装备，同样在公路铁路、地下隧道和冶金工程等领域得到广泛应用。设备如图 5 所示。

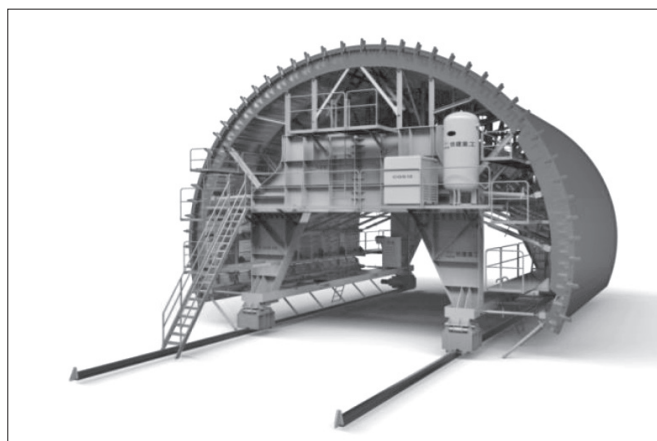


图 5 混凝土湿喷台车

(4) 液压仰拱栈桥：采用液压仰拱栈桥来保证仰拱施工时运输道路的通畅，各工序平行顺畅进行。仰拱栈桥长度 48m，栈桥单片宽度 3m，采用整体式设计，栈桥主梁长度 36m，两端设 6m 斜坡便于机械行驶。

(5) 防水板铺挂台车：大凉山隧道防水板的安装采



图 6 防水板挂布台车

用长度 6.8m 的防水板台车辅助安装,行走电机 2.2kW,速度 6m/min,液压升降工作压力 $P=16\text{MPa}$,轨中心距为 $5800\text{mm} \pm 5\text{mm}$ 。该设备具备防水板的铺设、安装及二衬钢筋安装的功能。现场设备如图 6 所示。

(6) 二衬台车:大凉山隧道二衬施工采用边顶拱式砼衬砌钢模台车(简称二衬台车),台车行走速度 6.5m/min,单边最大脱模量 100mm,水平调整量 100mm(单边),系统流量 $Q=23\text{L/min}$,系统工作压力 $P=16\text{MPa}$,轨中心距 $(6500 \pm 10)\text{mm}$ 。现场设备如图 7 所示。

(7) 二衬养护台车:大凉山隧道二衬混凝土养护采用二衬养护台车养护,其特点是配置温控设备,实现同温养护,自动喷淋养护台车通过底部增压泵将水输送至顶端管道的方式,对初脱模混凝土进行喷淋养护,使混凝土表面始终处于均匀湿润状态。自动喷淋养护台车能够实现 24m 范围内自行往返、3h 间隔自动喷淋,兼备隧道除尘功效。现场设备如图 8 所示。

2.3 施工工艺

现场施工流程顺序:三臂凿岩台车超前支护钻孔→三臂凿岩台车爆破孔钻孔及爆破作业→出渣→湿喷机械手初喷砼→拱架安装→锚杆及锁脚施工→湿喷机械手复喷砼→仰拱施工(如有)→自动化防水板铺挂台车铺设防水板及钢筋绑扎安装→浇筑二衬砼→喷淋养护。

3 基于机械化工序的安全步距确定

机械化配套工装施工后,大型机械工装在原安全步距要求下难以发挥作用(原安全步距要求:IV级围岩仰拱 50m,二衬 90m)。根据爆破飞石安全距离、设备长度及施工作业空间的要求,进行大凉山隧道安全步距重新调整,将掌子面与仰拱距离调整为 80 ~ 100m,掌子面与二衬距离调整到 180 ~ 200m。安全步距各种长度如表所示。

3.1 全断面法开挖进尺分析

位于大凉山 1# 隧道进口端正洞 YK75+100 ~ YK75+400 处,为 IV 级围岩,按照传统施工工艺要求,IV 级围岩要求台阶法施工,每循环开挖不得大于 2 榀拱架,无法从根本上提高大型机械设备施工功效,因此采用机械化施工时,每循环的开挖进尺应适当增大。根据大凉山隧道施工工况

分析,将安全问题、施工进度及机械工效发挥综合考虑,根据掌子面围岩情况、设计预支护类型的选择,计划每循环的开挖进尺控制在 3m 以内。

3.2 仰拱进尺分析

在机械化配套后,掌子面的进尺在围岩好的情况下进尺可达 3m,平均每天一循环,仰拱每板的施作时间约为 3 天,如按照原要求(仰拱开挖进尺小于 5m),仰拱与掌子面间的距离将无限拉长,所以在围岩情况较好时,仰拱每板的长度应大于 9m 才能追赶掌子面进度,快速封闭成环;即使在围岩情况较差时,掌子面进尺也可达 1 ~ 2m,仰拱每板的长度也不应小于 6m,如果小于 6m,在围岩情况好转时,掌子面将进尺加快,仰拱



图 7 二衬台车

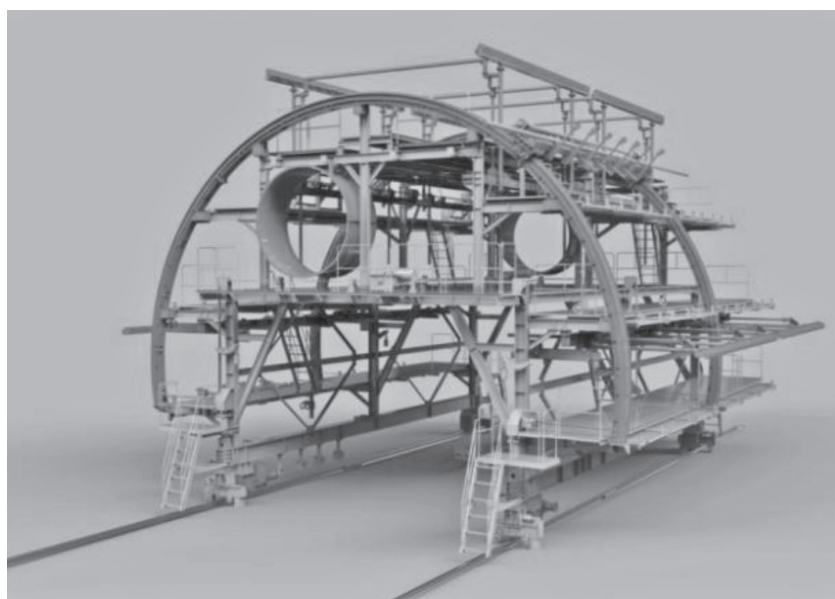


图 8 二衬养护台车

表 设备及安全距离长度

①	飞石安全距离	30 ~ 50m	⑥	仰拱上栈桥	30m
②	台架	8m	⑦	防水板台车	7m
③	设备安全距离	6m	⑧	防水板预留距离	30m
④	设备停放距离	18m	⑨	二衬台车	13m
⑤	仰拱	18m	⑩	设备协调距离	20m

会由于施工时间长出现进尺滞后，最终导致仰拱与掌子面距离拉长。将以上分析与二衬施工 12m 综合考量，为保证仰拱进度与二衬进度同步，仰拱每板的浇筑长度应为 6m 或 12m。

3.3 掌子面距仰拱距离分析

在机械化配套后，安全步距若按照原有规定，大型机械化施工将难以发挥作用（原安全步距要求：Ⅳ级围岩仰拱 50m，二衬 90m），需将掌子面与仰拱间距拉长。因爆破时所需的距离最长，并且危险性更高，现对爆破时所需的安全距离进行分析。经现场验证，爆破后飞石的距离在 30 ~ 50m 之间，台架长 8m，三臂凿岩台车长 18m，混凝土喷射台车 11m，设备安全距离 6m，仰拱栈桥 48m。在飞石较远的情况下，机械摆放所需的距离为 40+8+6+18+11=83m，即使在飞石较近的情况下所需的距离也应大于 80m 才能确保安全。综上所述，仰拱与掌子面距离应控制在 80 ~ 100m。

3.4 掌子面距二衬距离分析

在使用防水板台车与二衬台车后，仍按原安全步距要求将难以发挥机械工装的作用（原安全步距要求：Ⅳ级围岩仰拱 50m，二衬 90m），需将掌子面与二衬间距拉长，现对所需的距离进行分析。在仰拱栈桥处，由于排水沟的存在，栈桥只能放在隧道右侧，这就提升了大型设备或车辆在通过栈桥的难度。在大型机械通过防水板台车后，需要及时调整位置通过栈桥，经现场验证，当栈桥与防水板台车之间的距离小于 30m 时，部分大型设备将无法通过，因此栈桥与防水板台车的间距应不小于 30m。防水板台车自身长度约 7m，二衬台车长度约 12m。另外防水板台车与二衬台车的距离应当大于 24m，

否则可能会出现二衬台车一板施工完成后无法继续下一板施工的情况，导致工序衔接出现问题，降低施工效率，同时由于二衬台车轨道问题，防水板台车与二衬台车的距离应当进一步拉大至 30m，再考虑各机械设备之间的安全距离共 20m。因此仰拱与二衬之间的距离应不小于 30+7+13+30+20=100m，再将仰拱与掌子面距离一同考虑。综合以上原因得出，掌子面距二衬距离在 180 ~ 200m 为宜。

4 结语

论文以“乐山—西昌”高速公路“马边—昭觉”路段的在建大凉山隧道洞口工程为工程背景，首先分别介绍了三臂凿岩台车、拱架安装台车、混凝土喷射台车、仰拱栈桥、防水板台车和二衬台车等大型机械工装，其次对机械配备后的施工工艺进行介绍，最后根据大型机械工装配备后所必需的空间，确定合适的开挖进尺和安全步距。最终根据围岩情况及设计预支护类型确定掌子面开挖进尺 1 ~ 3m，仰拱与掌子面距离 80 ~ 100m，掌子面与二衬距离 180 ~ 200m，仰拱根据围岩稳定情况开挖长度 6m 或 12m。

参考文献：

[1] 张传智，侯羿腾，张辉傲，等．全断面法和微台阶法对大断面隧道Ⅲ级围岩适用性研究[J]．四川建筑，2021，41(06)：154-158.

[2] 刘大刚，赵博洋，辛维克，等．高原铁路隧道长大斜井施工装备适应性及机械化配套研究[J]．铁道建筑，2021，61(12)：86-90+108.

[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.

[4] 张鑫伟．高速铁路长大隧道工程中的机械配套施工技术[J]．工程机械与维修，2021(06)：152-153.

[5] 方俊波，刘洪震，翟进营．山岭隧道爆破施工技术的发展与展望[J]．隧道建设（中英文），2021，41(11)：1980-1991.