

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.030

调水总干渠引水隧洞复杂地质条件下 TBM 卡机分析及脱困技术研究

张伟峰,王海平,赵鑫

(青海省引大济湟工程建设管理局,青海 西宁 810000)

摘要:针对青海引大济湟调水总干渠引水隧洞 TBM 掘进机在特大断层、高海拔、大埋深等不良地质条件下工作卡机、掘进速度慢的技术难题,结合现场地质、岩性和 TBM 机工作特性,对卡机原因进行了分析研究,并由此提出相应脱困措施与应用技术。研究表明,特大断层开挖面塌方及高地应力造成的围岩过大收敛变形,是造成掘进机卡机和设备损坏的根本原因。短进尺、强支护、超前物探和实时变形监测是规避卡机的有效措施。卡机后应进行临时顶拱及方木支护,按照前盾脱困-支撑盾至尾盾支护变形置换的步骤进行脱困施工。

关键词: TBM;卡机;不良地质;脱困措施;应用技术

中图分类号: TV53+8.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)06-0160-05

TBM Jamming Reasons and the Technology of Relieving Difficulties under Complex Geological Conditions

ZHANG Weifeng, WANG Haiping, ZHAO Xin

(Qinghai Provincial Yindajihuang Project Management Bureau, Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: Aiming at the technical problems of TBM tunneling machine jamming and slow tunneling speed in the main diversion tunnel of Qinghai Yindajihuang water diversion project under the condition of super-large fault, high altitude, large buried depth and other bad geology, combined with the site geology, lithology and the working characteristics of TBM machine, the reasons of the machine jamming are analyzed and studied, and the corresponding measures and application technology are proposed. The study shows that the collapse of excavation face of super-large fault and the excessive convergence deformation of surrounding rock caused by ground stress are the fundamental reasons for the jam of road header and the damage of equipment. Short footage, strong support, advanced geophysical prospecting and real-time deformation monitoring are effective measures to circumvent the card machine. The temporary roof arch and square timber support should be carried out after the machine is jammed, and the construction should be carried out according to the steps of the front shield release-support shield to tail shield support deformation replacement.

Keywords: TBM; jamming; unfavorable geological condition; relief measures; applied technology

引水隧洞是为了解决水量时空分布不均匀的输水建筑物之一,我国已建和在建的长距离输水隧洞多采用 TBM 掘进机施工^[1-3]。在高海拔、长距离、大埋深和大断层等复杂地质条件下,TBM 会经常出现卡机事故的发生,严重制约工程施工进度^[4-6]。引大济湟工程作为青海省一号水利工程,是事关湟水流域可持续发展的战略性调水工程,也是青海省有史以来建设规模最大、综合效益最广、受益群众最

多、建设条件最复杂的水利工程。调水总干渠是引大济湟的控制性骨干工程,承担着从大通河流域向湟水河流域输水的重要任务。引水隧洞穿越大坂山,进口(K0+060—K3+000)为采用人工钻爆段,出口(K3+000—K24+165.83)采用德国维尔特双护盾 TBM 施工,后为加快施工进度,在引水隧洞进口段增加一台法国生产的 NFM-TBM,由隧洞进口向出口方向掘进(见图 1)。该隧洞工程具有高海拔、大

断层、大埋深、长距离等主要特点,工程地质条件极其复杂,给施工带来前所未有的考验。隧洞掘进过程中遭遇特大断层,屡次受到塌方、涌水、涌沙、突泥等不良地质问题困扰,见图2。本文主要结合调水总干渠引水隧洞在TBM掘进施工中遇到的复杂地质条件,总结分析了F4、F5大断层处复杂地质条件下TBM卡机原因及脱困措施,提出了在多种复杂地质条件下规避TBM卡机的措施和方法。



图1 TBM掘进设备启动



图2 TBM遭遇泥石流、涌沙

1 工程概况

调水总干渠作为“引大济湟”的骨干工程,地处大陆腹地、中纬度高原地区,高寒少氧,为典型的半干旱大陆气候,一年夏秋季短,冬季长且寒冷,冰冻期长。引水隧洞穿越达坂山,埋深最大达1100 m,洞线长24.17 km,穿越地层地质条件极其复杂。大埋深、长隧洞、高海拔是调水总干渠工程的重点和难点。2006年10月11日隧洞出口段TBM开始掘进,至2008年4月共完成掘进6.77 km。2008年4月TBM进入F4、F5断层破碎带后,在桩号17+140处首次出现卡机,之后因这种地质条件造成了TBM掘进机10余次卡机事故。

引水隧洞TBM掘进中遇到的主要工程地质问题,包含断层破碎带、涌水、煤层瓦斯、高地应力、硬岩岩爆、软岩塑性变形等。其中,主要的断层为大坂山北缘断裂带,大坂山南缘断裂带,金子沟断层带,

煤窑沟断层带等。引水隧洞穿越大小断层30余条,一般断层宽度10 m~30 m,较大断层宽度超过300 m,最大断层宽度达到1100 m,工程区段岩体中紧密褶皱较为发育大坂山北缘断裂带(F1、F2),大坂山南缘断裂带(F4、F5)、金子沟断层带(f11、f12'、f12),特别是煤窑沟断层带(f13)和磨扇沟断裂带(f14)断层宽且处于沟谷地段,断层充填物为碎裂岩夹断层泥,可能存在较强的涌水,TBM通过断层带时很容易造成刀盘前面和拱部坍塌,容易发生TBM刀盘及盾壳被卡。隧洞通过的含水地层长度约4591 m,局部存在高承压水含水地层,易引起含炭页岩、煤层塌方。涌水类型主要是脉状地下水的集中涌水型,隧洞初期累计最大涌水量为 $33.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,约 $3.84 \text{ m}^3/\text{s}$,正常涌水量合计 $10.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,约 $1.23 \text{ m}^3/\text{s}$ 。工程区大坂山北麓(进口段)水文地质条件更为复杂,地下水更丰富,隧洞涌水量较大,涌水灾害较严重。在高埋深地段岩体中,由于地下水水压力较高,隧洞开挖后,地下水向隧洞集中渗流,水力坡度大,冲蚀作用加强,断层破碎带、侵入岩接触带内的松散充填物易产生变形或被高压地下水带走,形成涌泥、诱发大量塌方,同时使裂隙的连通性增加,从而增加渗透能力。引水隧洞要穿越4128 m的煤系地层和约5000 m的含炭页岩,以上地层可能存在瓦斯,侏罗系地层洞段(桩号K3+000—K7+128)和三叠系上统第二段的隧洞段(桩号K7+128—K12+201)的地层中含有煤线,分析有瓦斯气体。

调水总干渠工程引水隧洞最大埋深1100 m,埋深大于600 m的隧洞长约10 km,埋深大于900 m隧洞长约2.7 km,属深埋长隧洞,相应地应力很高。埋深130 m~600 m隧洞段最大水平应力约为6 MPa~20 MPa;埋深1000 m左右的隧洞段最大水平应力近30 MPa。由于地应力的影响,在干燥和质地坚硬的岩层中可能发生岩爆,在软岩地层中极易发生塑性变形。

2 F4、F5大断层TBM卡机

2.1 卡机段地质问题

F4、F5大断层段岩石主要为碎裂岩,次为糜棱岩,夹有断层泥。母岩为砾岩夹少量泥质粉砂岩,砾岩为泥质胶结,砾岩粒径0.4 cm~0.5 cm,部分砾岩在热力作用下高岭土化。如图3所示,岩石极破碎,强度极低,为极软岩,地下水丰富,砾石高岭土化严重。开挖过程中,围岩变形量大,速率快,塌方严重,并有泥水混合物流出。

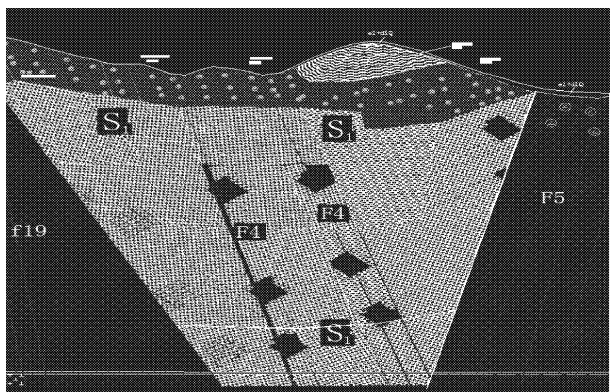


图 3 F4、F5 大断层段地质剖面图

2.2 TBM 卡机经过及原因

2008 年 4 月 TBM 掘进进入 F4、F5 断层破碎带

前, TBM 掘进整体比较顺利, 最高进尺 750 m/月。分析影响 TBM 进度的主要原因有: TBM 始发掘进 2 km 范围内进行试掘进和设备调试, 进度控制较慢; 掘进过程中遭遇多处断层破碎带及影响带, 出现多次 TBM 卡机及出渣孔被封堵现象, 使正常掘进受到一定影响; 桩号 K20 + 161—K20 + 062、K18 + 784—K18 + 777 段等由于不可预见的地质条件导致多次 TBM 卡机, 使正常掘进受到很大影响; 累计 2 km 左右的极硬岩 TBM 掘进。围岩主要为片麻岩、花岗岩、石英岩、花岗片麻岩, 岩石坚硬, 掌子面裂隙不发育, 完整性非常好, 石英含量极高, 如图 4、图 5 所示, 导致掘进速度慢, 且刀具磨损严重, 换刀数量大、频繁, 对工期及整体进度影响很大。



(a) 花岗石英岩



(b) 下元古界片麻岩、花岗片麻岩

图 4 引水隧洞掘进中遇到的极硬岩



(a) 异常损坏一



(b) 异常损坏二

图 5 极硬岩 TBM 刀具的异常损坏

TBM 掘进至 K16 + 884.8 停止, 处理受地应力损坏的盾壳及刀盘。在恢复 TBM 掘进, 进入全断面后, 由于处在 F4 断层内, 围岩为碎裂结构, 随着刀盘往前掘进, 拱顶部持续发生坍塌。TBM 全断面掘进 5.4 m 时, 掘进推力逐渐加大且没有贯入度, 最后将掘进推力提高至 11 000 kN, 但 TBM 仍无法往前掘进。人工掏开护盾观察口, 从观察口往刀盘方向发现前盾及刀盘处塌腔高度最高处超过 5 m, 且有大量岩体落在盾壳用刀盘上, 最终 TBM 全盾被困。掘进洞段处于 F4 断层内, 围岩为碎裂结构, 岩块间夹

有红色物质, 局部夹泥饼状充填物, 随着刀盘扰动, 岩体不能自稳, 导致塌方。塌方后隧洞顶部地应力释放, 水平地应力持续作用, 在与顶部坍塌体自重的共同作用下, 造成前盾两侧被挤死, TBM 被卡。

造成工程施工受阻的最根本原因是 F4、F5 断层破碎带极为复杂的地质条件, 以及隧洞埋深达到 800 多米, 而引起的高地应力, 经过实测该段最大水平主应力值在 21.1 MPa ~ 22.1 MPa 因此 TBM 进入 F4、F5 断层破碎带后, 一是掌子面发生大规模塌方导致 TBM 卡机, 二是在高地应力下 TBM 主机部位

的围岩快速发生收敛变形,导致TBM主机整体被周边围岩完全抱死。同时,由于此段围岩存在极大的偏压,从而导致人工处理过程中极易发生支护结构变形失稳。

2.3 不良地质条件对TBM设备的影响

自引水隧洞发生卡机以来,由于极为特殊不良地质条件导致TBM的不同部位发生不同程度的损害。在进行TBM改造洞室扩挖过程中,由于处在断层破碎带,复杂的、极为特殊的不良地质条件超出预期,致使收敛变形的围岩产生极大偏压力直接作用于TBM盾壳上,导致TBM主轴承、主机等设备进一步受到损害。TBM改造洞室二次扩挖施工过程中发生严重塌方事故,造成TBM主机整体被掩埋。一直进行TBM尾部塌方处理和旁通洞施工,旁通洞施工多次遇到大规模塌方。TBM主机和连接桥一直被塌方掩埋,收敛变形的围岩对TBM产生极大压力,恶劣的环境导致TBM主机及内部设备受到的损害进一步加重。TBM改造洞段地质条件的复杂性超乎预期,致使TBM损坏程度十分严重,导致TBM

整修改造方案发生较大变化,由原来的局部改造变为整体大修处理,更换新的伸缩护盾、支撑护盾和尾盾等。

3 TBM卡机脱困采取的主要措施

常用的施工脱困方法较多,如:侧壁导坑法、辅助坑道法、设备技术改造等^[7-9]。虽然上述方法都能脱困,但是方法复杂,施工周期较长。引水隧洞TBMF4、F5断层处极高的地应力引起围岩快速变形是引起TBM卡机的根本原因,由于F4、F5断层处复杂的地质条件,围岩异常收敛,TBM护盾压力过大,极容易造成卡机现象^[10-14]。F4、F5断层处TBM脱困施工分为两个部分,分别为前盾脱困,支撑盾至后盾变形部分的支护置换。

3.1 前盾脱困施工

前盾脱困施工从中间向两边进行,在原塌腔拱部防护下按设计断面安装拱顶拱架后,采用方木临时支撑在盾壳上,见图6,然后分左右开挖拱脚,并及时进行支护。



(a) 掌子面塌方



(b) 钢拱架失稳

图6 方木临时支护

3.2 支撑盾至尾盾支护变形置换施工

拱架置换施工开挖断面与前盾段脱困开挖断面一致,置换顺序为自原上导坑最末榀拱架往尾盾方向进行,如图7所示。置换时自进口方向右侧向左侧将拱架逐榀分段剥除,剥除时如果围岩面松弛掉快,可初喷砼稳固岩面,也可根据现场情况布设超前小导管稳固之,进行既有支护的剥除。拱架安装位置原则上采用既有拱架间内插,如拱架间距过大,可适当减小拱架间距,增加拱架榀数,具体支护参数与前盾脱困施工一致。

调水总干渠引水隧洞工程的地质条件复杂程度在国内外目前已建和在建的TBM施工隧洞项目中十分罕见,也无可借鉴的成功经验。为解决工程问题,多次聘请业内有经验的专家、院士进行咨询、数

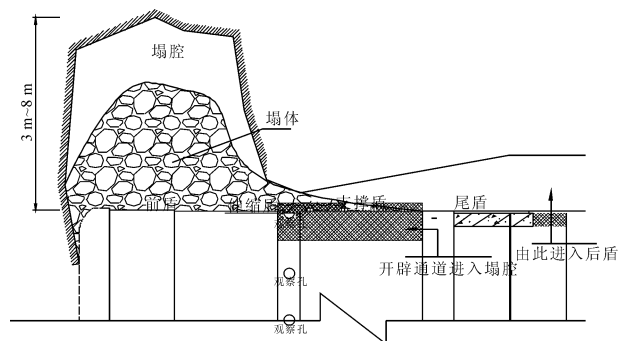


图7 尾盾支护变形置换施工

次邀请专业的技术人员和施工单位现场指导,期间也曾采取了TBM受困部位开挖释放压力,使TBM迅速脱困后全断面掘进^[15];全断面人工超前短循环开挖,TBM跟进;半断面人工开挖+超前大管棚注

浆预加固 + TBM 全断面掘进;绕洞 + 全断面钻爆施工 + TBM 步进;两侧小导洞快速开挖释放压力后 TBM 掘进;上半断面开挖 + 下半断面 TBM 掘进;在注浆材料方面,采用了水溶性聚氨酯灌浆材料,超细水泥注浆,水泥水玻璃注浆,普通水泥注浆等一系列措施和方法,经过不断尝试和创新,终于实现隧洞的贯通。

4 结 论

结合引大济湟调水总干渠引水隧洞 TBM 卡机和脱困的施工经验,得到以下结论:

(1) TBM 卡机的根本原因是高海拔、大断层、大埋深等复杂地质条件引起高地应力,致使掌子面发生大规模塌方,TBM 主机部位的围岩快速发生收敛变形,导致 TBM 主机整体被周边围岩完全抱死。

(2) 为规避卡机事故,在类似复杂地质条件下的隧洞掘进中,尤其是在高寒缺氧、大埋深、大断层、长隧洞 TBM 施工中,需做到“短进尺、强支护”,采用先进的超前物探方法,超前预报,时刻监测围岩变化情况,超前支护。

(3) 为了缩短施工卡机事件,提高掘进效率,可提前准备多种卡机方案,提前谋划,以备脱困之用。

(4) 采取双竖井施工方案,不但投资增加较大,而且工期延长较多,还存在如富水地层排水、断层处理和煤系层防爆、200 m ~ 300 m 竖井垂直物资运输、洞内排烟、机械设备的正常运行、供电质量保证等安全技术问题。

(5) 采取绕洞方案实施会存在施工进度慢、主洞人工开挖采取临时支护后会出现较大变形。

参考文献:

[1] 徐虎城.断层破碎带敞开式 TBM 卡机处理与脱困技术

探析[J].隧道建设(中英文),2018,38(S1):156-160.

- [2] 毛拥政,张民仙,宋永军.引红济石工程长隧洞 TBM 选型探讨[J].水利与建筑工程学报,2009,7(1):65-67.
- [3] 高燕芳.TBM 掘进技术在软岩隧洞中的应用[J].水利与建筑工程学报,2011,9(6):126-128.
- [4] 马福印,罗伯特·利维纳尼,杜喜龙.引大济湟调水总干渠 TBM 机施工脱困及拆卸技术研究[J].中国农村水利水电,2017(10):120-124,130.
- [5] 苏 珊,曹 海.新疆某隧洞开挖 TBM 卡机原因及脱困处理措施[J].水利水电技术,2018,49(2):77-85.
- [6] 田志斌.山西中部引黄工程 TBM 卡机成因分析及脱困技术[J].水利水电快报,2018,39(5):31-34.
- [7] 杨继华,杨风威,姚 阳,等.CCS 水电站引水隧洞 TBM 断层带卡机脱困技术[J].水利水电科技进展,2017,37(5):89-94.
- [8] 房敬年,苗 栋,房后国,等.破碎围岩中输水隧洞双护盾 TBM 卡机分析及其脱困措施[J].水电能源科学,2017(10):171-173.
- [9] 薛永庆.引汉济渭工程 TBM 卡机脱困技术[J].铁道建筑技术,2017(8):106-110.
- [10] 贾 璐,温法庆,刘圣勇,等.特殊地质条件下盾构机脱困技术研究[J].施工技术,2016,45(23):62-66.
- [11] 田志斌.山西中部引黄工程 TBM 卡机成因分析及脱困技术[J].水利水电快报,2018,39(5):31-34.
- [12] 温 森,杨圣奇,董正方,等.深埋隧道 TBM 卡机机理及控制措施研究[J].岩土工程学报,2015,37(7):1271-1277.
- [13] 王焕明,陈方明.复杂地质区 TBM 卡机成因分析及脱困技术[J].人民长江,2014,45(3):66-69.
- [14] 王 江.引水隧洞双护盾 TBM 卡机分析及脱困技术[J].隧道建设,2011,31(3):364-368.
- [15] 贾 璐,温法庆,刘圣勇,等.特殊地质条件下盾构机脱困技术研究[J].施工技术,2016,45(23):62-66.