

特长隧道 TBM 掘进施工技术研究

Study on TBM boring technique for construction of super long tunnel

彭道富, 李忠献
(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 针对秦岭隧道复杂地质情况, 采用 TBM 施工方法, 对秦岭 I 线隧道出口段的 TBM 掘进速度与地质、设备维护及管理的关系进行了分析, 并提出提高工时利用率的方法, 为敞开式 TBM 在我国隧道工程施工中的应用积累了经验。

关键词: 特长隧道; TBM; 施工; 技术研究

中图分类号: U 455.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2003)02-0179-05

作者简介: 彭道富(1958-), 男, 湖南浏阳人, 1983 年毕业于石家庄铁道学院隧道专业, 天津大学在读博士生, 教授级高工, 中铁十八局集团有限公司副总经理。

PENG Dao-fu, LI Zhong-xian

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: According to complex geological condition in Qinling tunnel which is constructed by using TBM method, based on analysis of TBM method and construction technology, the relations between progress in line I of Qinling tunnel and geology, and between equipment maintenance and management are analyzed. The method to increase utilization of work time is proposed. Therefore experience of open TBM used in tunnel construction is accumulated in China.

Key words: super long tunnel; TBM; construct; technical study

0 前言^①

掘进机种类繁多, 根据不同地质条件、隧洞走向及形状, 可选用与之相适合的掘进机。隧道掘进机械可分为 3 种: 平巷掘进机(部分断面掘进机)和冲击平巷掘进机; 盾构机; 全断面隧道掘进机(TBM)。全断面隧道掘进机(tunnel boring machine)是指以包括岩体的地质为对象, 装有撑靴, 依靠撑靴而获得掘进反力进行推进的一种隧道掘进机械, 具有能连续作业、施工速度快、工期短、环境污染小、安全性能高等特点。研究表明, 敞开式全断面隧道掘进机在隧道围岩完整性好、强度中等的条件下, 其快速掘进的优越性得到明显发挥, 是当今世界硬岩长隧洞快速掘进的首选机械。

我国首次在秦岭 I 线铁路隧道施工中应用 2 台(进口、出口段各 1 台)敞开式 TBM 施工($\phi 8800$ mm), 施工经验相对缺乏。所用掘进机为德国 WIRTH 公司生产的 TB880E 型敞开式隧道掘进机, 是集液压、电气、电子、机械于一体的先进的隧道掘进机, 自身配有超前钻探、激光导向(ZED)、监控监测、通风除尘、围岩支护(喷锚、岩石注浆、钢拱架安装)和数据采集(WADS)等自动化系统。TB880E 型敞开式隧道掘进机全长 256 m, 总重量约 1750 t, 变压器容量 5400 kVA, 刀盘直径 8.8 m, 掘进速度 1.0~3.5 m/h。从结构上分主机、连接桥、后配套及附属设备。TB880E 掘进机是利用刀盘上安装的 73 把盘形滚刀, 在强大的推力和扭矩作用下, 驱动刀盘转动, 挤压破碎岩石。刀盘上的 8

个边铲斗和 4 个中心铲斗, 将破碎的石碴收集在内机架的皮带机上, 即完成掘进机的破岩和装碴功能。它适用于围岩稳定、整体性较好, 岩石抗压强度较高, 节理发育(岩体体积裂隙数 $J_v = 3 \sim 20$), 围岩类别为 III、IV、V 类的地质条件, 而岩石抗压强度极硬或软弱易坍塌的地质条件不适于 TBM 掘进机施工。

秦岭隧道全长 18.456 km, 地质条件复杂, TBM 多次通过断层破碎带和岩爆等不良地质地段。I、II 类围岩段长约 1.45 km, 占总长的 7.8%, 其余为 IV、V 和 VI 类^[1]。岩块单轴抗压强度高, 大都在 130 MPa 以上, 最高达 302.1 MPa, 而且石英含量高, 全长范围内围岩石英含量在 15% 以上, 最大为 30%, 岩块坚硬, 抗磨抗钻性高, 极难切割破碎^[2]。本文在比较 TBM 与钻爆法施工基础上, 对出口段 TBM 施工中月进度、各种作业时间的占用比例进行了分析。

1 进度分析

秦岭 I 线隧道出口段 TBM 施工 18 个月, 各月进度见图 1、2 所示, 共完成掘进 5622 m, 其中, 最高月进度 508.96 m, 最高日进度 35.254 m, 平均月进度 301.06 m, 平均日进度 11.13 m, 最低月进度 15.27 m, 最低日进度 0.618 m。如此大的差距主要原因有 TBM 主机及各种后配套设备的使用与故障问题、围岩地质条件(坍塌、岩爆及涌水)、通风和供电等问题及施工组织问题。

① 收稿日期: 2002-05-07

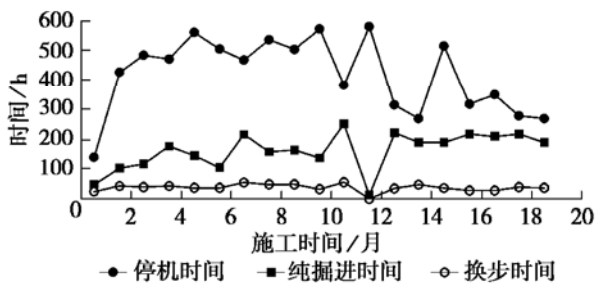


图1 TBM 施工的纯掘进时间及停机时间

Fig. 1 Excavating time and stopping time in TBM construction

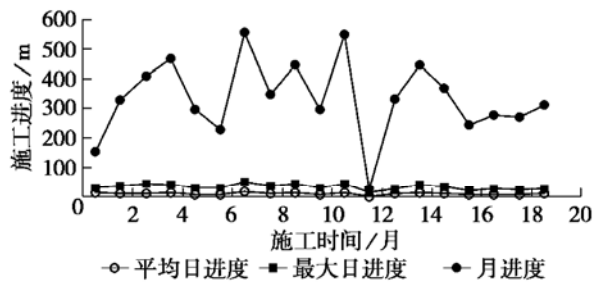


图2 TBM 施工进度

Fig. 2 Rate of progress of TBM construction

低于平均月进度的几个月出现的情况及发生的事件主要有: 施工组织方面有待改进; TBM 掘进机出现机械故障(因 TBM 仰拱块吊机损坏, 导致仰拱块无法安装, 图 1 中第 12 个月仅掘进 15.27 m); ZED 系统故障; 围岩地质较差或有岩爆发生, 支护喷锚时间长。由此可见: ①施工组织对整个施工生产起决定性作用, 直接关系施工进度和质量; ②大型新设备的熟练掌握和维护保养是施工作业的一个重要环节, 一旦设备出了问题, 施工将停顿, 直接影响施工进度; ③应充分预知前方围岩地质, 制定切实可行的预处理方案, 尽可能地避免不良地质问题造成掘进停顿或停机事故。

由机械的利用率与掘进速度关系得出在相同条件下日进度与掘进时间成正比, 如 1998 年 3 月份机械利用时间与日进度关系如图 3 所示, 其每个点都比较有规律地排在函数 $Y = 2.23X$ 的周围, 即 TBM 在施工中每小时纯掘进 2.23 m。在相同条件下, 调整好施工组织安排, 提高机械的使用率才能提高施工速度。在施工过程中, 也应提高施工人员的技术水平, 加强设备的保养和维护, 减少因设备原因停机, 提高工作效率。

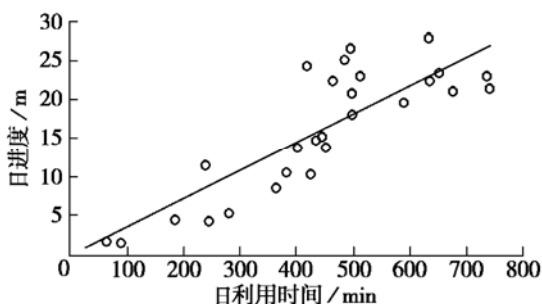


图3 机械的日利用时间与进度关系

Fig. 3 Curve of rate of progress and time of TBM used in one day

月进度与机械的使用时间的关系曲线如图 4 所示, 回归曲线为 $Y = 85.681 + 1.3184X$ 。在施工过程中, 由于受各种因素的综合影响。如刚开始时施工人员操作不熟练, 随着熟练程度的提高进度逐渐增快, 随着施工长度的增大, 运输、通风等长度增大, 进度会有所下降。TBM 施工进度与围岩地质条件关系密切, 所使用的敞开式掘进机, 适应于岩石的单轴抗压强度值在 30~150 MPa 之间, 一般岩石单轴抗压强度越低其掘进速度越快, 岩石的单轴抗压强度越高, 其掘进速度越低。秦岭隧道围岩的岩石单轴抗压强度绝大部分在 100~250 MPa 之间, 少数在 250~325 MPa 之间。在坚硬岩石中的 TBM 施工, 遇到的主要问题是 TBM 推力不足以刀刃切入岩石破碎的深度, 刀具、刀圈及轴承的严重磨损, 频繁更换, 费时又费钱。

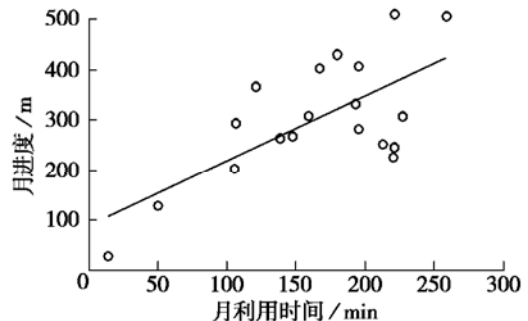


图4 机械的月利用时间与进度的关系

Fig. 4 Curve of rate of progress and time of TBM used in one month

2 TBM 通过不良地质地段的对策

秦岭隧道出口段 TBM 施工通过的不良地质类型主要有断层构造带、节理密集带、构造裂隙富水带和高地应力岩爆等。断层破碎带主要有 25 条, 即 $f_{ss1} \sim f_{ss20}$, f_{q13} , f_{14} , f_{q15} , f_{16} 及 F_2 , 均为逆断层, 宽度 1~230 m, 断层带的主要岩性为糜棱岩、破碎混合片岩、断层泥砾等。

2.1 根据不同地质条件合理选用 TBM 掘进参数

在 TBM 通过塌方地段时, 适当减少 TBM 的掘进速度、刀盘转速等掘进参数, 能有效减少围岩的扰动, 从而减少塌方或避免发生塌方, 使 TBM 安全、顺利地通过塌方地段。TBM 通过塌方地段的参数见表 1。

表1 II~IV类围岩的 TBM 掘进参数

围岩类别	推进速度 / %	刀盘转速 /($r \cdot \min^{-1}$)	推进压力 /MPa	扭矩 / %
II	40~50	2.7	4.5~8.0	35~50
III	塌方较大	40~60	2.7	7~12
	塌方较小	65~70	5.4	8~17
IV	50~65	5.4	20~25	50~65

2.2 边墙塌方的处理措施

隧道边墙塌方是由于边墙岩体较破碎或 TBM 支

撑压力过大引起的。根据塌方的规模大小,采用调节支撑靴压力和采用联合支护两种方式进行处理。

(1) 调节支撑靴压力的处理方式

TBM的支撑系统是采用在边墙上进行双排四角支撑,分为外机架1和外机架2两个支撑部分。每个支撑部分由8个撑靴组成,额定总支撑力为9100 kN,接地压力为 190 N/cm^2 ,每个撑靴支撑着设备的重量并将推力和刀盘扭矩的反力传递给边墙岩壁,当边墙围岩强度足以承受支撑靴压力时,TBM可正常掘进。因此,对小范围的边墙塌方,可通过锁死部分支撑靴,减少对围岩的支撑压力,同时相应地调整TBM推力、推进速度,来减小对围岩的扰动,从而减少或避免发生塌方,使TBM不停机,安全通过塌方地段。

(2) 联合支护的处理方式^[3]

当隧道边墙发生较大的塌方,边墙围岩强度不足以承受撑靴压力时,TBM将无法掘进,此时必须停机,采用喷锚网+钢拱+灌注混凝土的联合支护方式进行处理后再掘进。具体步骤为:①搭设作业平台;②清理危石;③打锚杆($\phi 22$, $L = 3.0 \text{ m}$);④挂钢筋网($\phi 8$, $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$);⑤安装钢拱架(由5片组成),边掘进边安装(间距 0.9 m),安装1榀钢拱架约需 $1 \sim 3 \text{ h}$;⑥在钢拱架之间焊接后 3 mm 的钢板,然后向内灌注掺加速凝剂的C30级细石混凝土,凝固后使撑靴支撑在初期支护上,TBM开始掘进。

2.3 拱部塌方的处理措施

隧道拱部塌方,按塌方的规模大小,有以下3种不同的处理方式。

(1) 隧道开挖后,在刀盘护盾上方或护盾后方出现崩塌或掉块的局部不稳定块体的滑塌时,其处理方式是为加密锚杆,挂双层钢筋网,并在锚杆外露端焊接 $\phi 22$ 的连接筋,然后喷混凝土。

(2) 隧道开挖后,在刀盘护盾上方或护盾后出现小型塌方时,其处理方式为加密锚杆,挂双层钢筋网,喷混凝土,安装槽钢。槽钢片用锚杆固定,每根锚杆固定 1 h 后拉拔力可达 2 t , 3 d 后可达 10 t 以上。安装槽钢片时需停机(约 30 min)。

(3) 隧道开挖后,在刀盘护盾上方或护盾后出现较大的塌方时,必须停机,用上述的联合支护方式进行处理。拱部塌方与边墙塌方所用的联合处理方式不同的是拱部塌方处理不用搭设作业平台。

2.4 用常规的钻爆法施工提前处理不良地质地段

TBM通过 $f_{ss13} f_{ss12}$ 断层带的处理DK78+120~DK78+200与DK78+960~DK79+120两段分别处于 $f_{ss13} f_{ss12}$ 断层带中,受断裂带的影响,构造裂隙发育,岩体破碎。主要岩性为碎裂岩、构造片岩、糜棱岩、断

层泥砾石等,岩石强度低,围岩稳定性差。其中,DK78+960~DK79+120段处于构造裂隙富水区。

该区域采用人工钻爆预处理,TBM穿行通过的方法,即利用II线平导开挖临时横通道进入I线隧道预处理,避免TBM在该区域受阻,影响整个隧道的施工。

2.5 TBM通过岩爆地段的对策^[4]

TBM通过岩爆地段的施工处理岩爆地段主要有DK77+130~DK77+860和DK76+130~DK76+790两段,发生岩爆的程度从轻微、中等到强烈不等,岩性以混合片麻岩为主,岩爆主要发生在洞室左拱部到左拱顶及右洞底。

(1) 防护对策:拱部打超前应力释放孔;拱角附近打超前应力释放孔;喷洒高压水;安装防护栏和网形护棚;支护作业人员佩带钢盔。

(2) 掘进对策:将刀盘退回一定距离,改液压驱动为电驱动;降低护盾顶部油缸压力,重新撑紧刀盘护盾;调整刀盘转速为 2.7 r/min ,推进速度调为 $20\% \sim 30\%$ 进行掘进。

(3) 支护对策:在开挖面发生岩爆后,采用喷、锚、网和钢拱架及时进行初期支护,减少围岩的暴露时间;对拱架支护后的开裂岩体进行注浆加固。

2.6 超前地质预报和围岩加固

TBM掘进通过可能发生塌方的地段,如果待塌方后再处理是相当困难的,因此,充分利用TBM的辅助设备超前地质预报和围岩加固,可以减少围岩塌方甚至不塌方。

TBM前外机架上超前钻机,可在刀盘上方水平方向 $80^\circ \sim 90^\circ$ 、最大仰角 10° 的范围内进行超前钻探。利用超前钻机与TBM自身配备的注浆设备配合,对隧道前方不良地质地段的围岩进行超前预注浆和超前管棚注浆加固。

3 围岩类别与掘进速度的关系^[5]

TBM的掘进速度与多种因素有关,一般情况下,与围岩类别密切相关。不同的围岩其特性有很大差异,围岩特性包括围岩抗压和抗拉强度、节理、裂隙间距和方向、岩石的矿物成分等,这些地质因素不仅决定采用掘进机是否能达到最佳效果,而且还决定刀具的消耗及掘进机所需扭矩、推力等。下面对岩石的可切削性进行分析。

设 T 为某一切割深度 D_c 的平均切向切割力,切割一单位体积岩石所需的能量为 S_c ,则它们间的关系为

$$S_c = T/D_c \quad (1)$$

可见,岩石的单位切割能量越大则切割越困难,但是,

最大与最小切割力 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 在割刀的工作上占有重要的地位,而第一次碎片形成所需的刻痕力与刀具的磨损有关。具有相同单位切割能量的岩石, $T_{\max}/T_{\min}$ 比值大的较比值小的难切割。

当坚硬岩石的结构中有裂纹存在时,此裂纹将削弱岩石强度并使其易于脆裂。这些裂纹可以使岩石不再受机械负荷时形成碎片而破裂,因而使得机器可能切割坚硬的岩石,为了利用裂纹削弱岩石强度的作用,切割深度必须有足够的数值,使被破碎的岩石有足够大的体积来包容大量的裂纹。体积太小的岩石由于不能包容或只能部分地包容这些裂纹,所以需要很大的力量来破碎它。这种情况在割刀刀刃附近是遇到的,并且是引起刀具磨损的主要因素。为了减少刀具磨损和获得高效率的切割,要求用深度切割,在低速下形成大型碎片。切割深度由下式得出,即

$$D_c = \frac{\mu_c N}{S_c}, \quad (2)$$

式中 μ_c 为切割摩擦系数; N 为垂直于切割运动方向的切割力。

切割最坚硬的岩石时,要求切割深度达 25.4 mm,以保证碎片的尺寸足以包容适当数量的裂纹。即如这时切割摩擦系数为 1,就要求每寸切割宽度所需的进给力与单位切割能量之比值大约为 1;反之,如切割摩擦系数小于 1,则比值要求增大。如增加切割深度,切割效率和刀具磨损还可以得到改善,这以机器的各个环节和其他几何因素要保持良好为条件,但上述数值是下限值。

坚硬的 V、VI 类围岩对 TBM 施工不利,主要影响是刀具磨损大,掘进速度有所下降,见表 2。硬度不太大且自稳性较好的 III、IV 类围岩对 TBM 施工有利;节理发育、自稳能力差的 II 类围岩对 TBM 施工不利,主要影响是需增加支护时间和空间;一般情况下 I 类围岩不适于 TBM 施工。在其他条件相同的情况下,不同的围岩类别其掘进速度有明显区别。通常,硬度越大,围岩类别越高,刀具磨损越大更换越频繁,发生故障机率越大,从而掘进速度减慢;节理发育,围岩软弱,自稳能力差的软弱岩体也会由于支护时间较长,影响掘进速度;反之掘进速度快。

表 2 各类围岩的 TBM 掘进进度

Table 2 Rate of progress of TBM in various rock

围岩类别	长度/m	掘进时间/d	掘进速度/(m·d ⁻¹)
II	290	41	7.2
III	973	92	10.6
IV	3164	271	11.7
V	1045	115	9.1
VI	132	18	7.6

4 提高工时利用率方法

TBM 的作业工时利用率即其净掘进时间与总的施工时间的比值,它是衡量 TBM 的使用及管理水平的指标之一,并在很大程度上决定着工程的施工进度。TBM 总的工作时间是净掘进、换步、刀具更换、TBM 的保养、维修及故障处理、停机进行的喷锚支护、石碴及材料运输、仰拱块预制及轨道铺设等多项时间的总和。

纯掘进时间利用率是指在一定工程施工时段内,掘进时间所占的时间比率,即

$$\lambda = \frac{\sum_M \sum_m T_j}{\sum_M T_t} \quad (3)$$

式中 λ 为纯掘进时间比率; M 为总保养循环时间次数; m 为一个掘进—维修循环中的掘进循环次数; T_j 为一个掘进循环的纯掘进时间(min); T_t 为一个掘进—维修保养循环时间(min)。

因此,通过缩短不必要的停机时间,而增加掘进时间是提高有效时间利用率唯一的途径和必须的要求。秦岭隧道出口段作业时间分配如图 5 所示,设备原因停机占 15%,刀具更换及现场原因停机占 35% (由于岩石坚硬,刀具磨损较为严重,致使掘进过程中不得不停机更换刀具,约占作业时间的 18%~20%),两者之和占到 50%,致使 TBM 的纯掘进时间比例仅占 30%。

综上所述,提高工时利用率的关键是加强组织管理,减少设备、刀具及现场等原因停机时间,并由 TBM 在不同岩性地段的掘进速度规定合理的工时利用率目标。

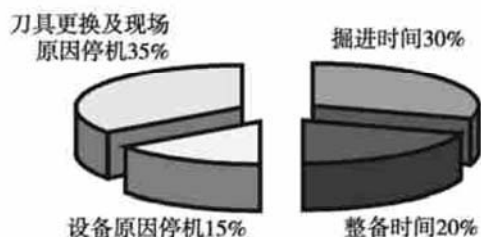


图 5 作业时间分配

Fig. 5 Distribution of work time

4.1 减少超载故障

从 TBM 各工序作业关系看,掘进操作是系统工作的起点。针对地质条件的不可选择性,要求选择不同的 TBM 掘进状态和参数。它根据刀盘工作的轴向推进和横向振动来控制机器刀盘刀具的宏观和微观工作状态。在掘进过程中,扭矩、推力和推进速度处于一种动态的平衡过程,它们因刀盘转速的不同而变化,而刀盘的转速随地质条件的不同在掘进前进行强制选择。因此,在进入正常掘进状态前,TBM 的掘进状态和参数必须有一个足够长的调整阶段,以保证刀具在掘进

的时候,现场施工中推力一般控制在70%~80%,不会因超载而发生故障或损坏失效。

掘进机超载控制分两种工况:①是硬岩工况,这时以控制推力为主,在掘进机允许最大推力的条件下,实施破岩掘进,必要时可全部更新刀具或喷泡沫剂来降低破岩推力以控制超载;②在粉破碎岩石中,这时掘进机以控制刀盘扭矩为主,在掘进机允许最大扭矩时,降低刀盘转速或增加扭矩来控制超载。

4.2 刀具更换

刀具更换占总工作时间的比值变化范围为4%~26%,要让刀具更换时间达到最低,在刀具质量保证的前提下,一是要尽可能地延长刀具的使用寿命,让其使用寿命达到设计值,降低换刀频率;二则要尽可能缩短每把刀的换刀时间。

刀具的寿命除和岩石对其磨损有关系外,还和刀具的尺寸、其能够承受的荷载、在刀盘上的排列方式、结构形式、刀具材质等有关,但这些都是由生产厂家决定的。在使用中,需要考虑的是与刀具寿命有关的另两个参数,即刀具的推力和刀具每转的切深。正常情况下,刀具每转的切深值越大,刀具的荷载也越大,常在重载下工作,势必影响到刀具的寿命,所以,应合理地选择刀具的推力及切深,使既满足施工进尺,又使刀具的荷载不致过大,以提高刀具寿命,降低换刀频率。

另一方面,提高操作工人的技术素质,减少每把刀的换刀时间意义也非常重大。整个秦岭隧道的施工刀具消耗为2266把,即便按照维尔特公司提供的平均每把35 min的换刀时间来计算,那么仅换刀一项也将耗费1322 h;也就是说,整个秦岭隧道施工过程中,TBM必须停机1322 h用于换刀。如果由于操作不当,每把刀换刀时间增加10 min,则TBM就要停机1700 h。由此可见,每把刀的换刀时间对TBM工时利用率的影响是不容忽视的。

4.3 TBM 保养维修及故障处理

TBM 维修、保养及故障处理时间占用率也是一个变化范围很大的参数,可达14%~30%。维修包括计划内和计划外维修,计划内维修在整个工程施工中是不可避免的,计划外维修,是不可预见的机械故障维修。要通过对TBM使用和维修各项操作规程的落实,使TBM各重要组成零部件的使用寿命达到其设计寿命值。让TBM的维修项目尽可能多地纳入到计划内维修,少发生或不发生计划外维修,这样,就可以掌握时间利用率的主动权,对工程进度做出合理的安排。

4.4 石碴及材料运输、支护、量测

石碴及材料运输、喷锚支护、不良地质地段的处理、仰拱块的预制及预制块和轨道铺设等均属于TBM

施工的重要组织部分,特别是石碴及材料运输,存在着合理调度和安排的问题,以保证TBM不会因石碴的运出及材料的运进运输能力不够而停止掘进,从而增加TBM的停机时间。此外,支护、量测、通风、对不良地质地段的处理等工序如果组织不好也将造成TBM的停机,因此,TBM的施工组织合理与否,也将对TBM工时利用率产生很大影响,应该引起充分重视。

4.5 新技术、新工艺推广应用

在TBM维护修理工作中,引进推广了一些现代修理新工艺、新技术,提高了TBM维修质量与水平,如推广应用了现代冷敷粘涂技术、现代设备减摩技术、螺栓化学固纹技术、快速堵漏技术和热喷涂技术等,大大节省了作业时间;改善部件的工作状况,控制故障的发生,延长了设备的使用寿命;节省成本。

5 结 语

(1)在秦岭隧道地质条件下,选用敞开式全断面掘进机及其主参数基本符合要求,并达到了预期效果。

(2)近几十年来隧道岩石掘进机技术得到了很大发展,但在我国铁路还处在刚刚起步,因为经验上的不足难免会走弯路。首先在大型引进设备的掌握和熟练上以及施工组织上还存在差距;欠缺在复杂地质条件下施工的良好对策;欠缺针对具体地质条件的TBM选型经验。

(3)敞开式全断面岩石掘进机只有在隧道围岩完整性好、围岩强度中等的条件下,才能充分发挥其快速掘进的优越性。对复杂的地质条件适应差,因此施工中应尽可能预先掌握地质情况,提前制定应对各种不良地质情况的对策。

(4)此台TBM掘进机的设计基本符合要求,从秦岭隧道的实践来看,达到了铁道部引进隧道掘进机提高我国铁路隧道施工水平的目的。

参考文献:

- [1] TBJ 3—85,铁路隧道设计规范[S].
- [2] 梁文灏,等.秦岭特长隧道采用TBM施工设计方案综述[A].国内外隧道掘进机文献汇集[C].铁科院西南分院信息研究室,1998.
- [3] 秦岭隧道掘进机通过坍方地段的对策[A].秦岭隧道TBM施工专题情报资料(第21期)[R].隧道工程局科研所信息室,1999.
- [4] TBM通过特硬岩、岩爆地段的施工技术[A].隧道掘进机TBM施资料(第5册)[R].隧道工程局科研所信息室,1997.
- [5] 傅德明,朱金林.岩石隧道掘进机施工技术[R].上海:上海隧道工程股份有限公司施工技术研究所科技情报室,1997.