

TBM 的应用及其有关问题和展望

张镜剑

(华北水利水电学院 郑州 450045)

1 概述

随着世界交通和供水的需要,以及设计理论的完善和施工方法的进步,国内外隧洞修建的数目和长度都不断增加。国外已建成的长于 10 km 的隧洞超过 100 条。闻名世界的联接英国和法国的英吉利海峡隧洞全长 49.2 km,于 1994 年底投入运行。1988 年日本本州到北海道的青函海底隧洞建成,长 53.9 km。

1995 年在奥地利召开的“TBM 隧洞施工趋势”国际研讨会上德国的 A. Haack 博士在他的论文中指出:将(欧洲)地下工程建筑计划考虑在内,到 2000 年欧洲交通网络隧洞长度可能远远超过 10 000 km。

1949~1994 年,我国铁路隧道新建总长度已超过 2 200 km,到 1990 年我国修建的水工隧洞总长超过 100 km。我国南水北调西线工程超前期研究中的长须一恰给弄自流引水方案,从雅砻江长须坝址上游左岸俄木其曲的龙振塘引水到黄河的恰给弄沟口,隧洞长达 131 km。山西省万家寨引黄入晋工程南干 7 号隧洞长达 43.5 km。甘肃省引大入秦工程盘道岭隧洞长 15.7 km。新建的从西安到安康的铁路线上的秦岭隧洞为两条平行的单线隧洞,是目前我国最长的铁路隧洞,其中 I 线隧洞全长 18 460 m,II 线隧洞全长 18 456 m,两条隧道间距 30 m,最大埋深为 1 600 m。

当隧道(洞)长度过长时,用常规法进行隧道施工将需要相当长的工期,隧道掘进机法施工则适合长隧道施工的需要。隧道掘进机英文名称是 Tunnel Boring Machine,简称 TBM。

根据国外实践证明:当隧道长度与直径之比大于 600 时,采用 TBM 进行隧道施工是经济的。TBM

的最大优点是快速。其一般速率为常规钻爆法的 3~10 倍。此外,采用 TBM 施工还有优质、安全、有利于环境保护和节省劳动力等优点。由于 TBM 提高了掘进速率,工期大为缩短,因此在整体上是经济的。TBM 的缺点主要是对地质条件的适应性不如常规的钻爆法;主机重量大;前期订购 TBM 费用较多;要求施工人员技术水平和管理水平高;对短隧道不能发挥其优越性。由于科学技术的不断迅猛进步,现在 TBM 可以适应较为复杂的地质条件,从松散软土到极坚硬的岩石都可以应用,使用范围日益广泛。TBM 的设计制造在一定程度上反映了一个国家的综合科学技术和工业水平,体现了计算机、新材料、自动化、信息传输和多媒体等技术的综合和密集水平。一门叫做“地质机械电子学”的学科应运而生,它把机械原理、电子学原理和机器人原理应用到岩土工程学中,包括所有岩土工程技术和 TBM 技术。未来的发展属于自动化隧洞掘进机。目前,人们已能在办公室控制掘进机操作——法国的斯特拉堡工地证实了这一事实。

掘进机的针对性很强,不同的地质条件需要不同的掘进机,也就产生了不同的掘进机;有的适用于软土,又称为盾构机;有的适用于岩石。但是,所有各种类型的掘进机都是由主机和配套系统两大部分组成。

世界上著名的岩石掘进机制造厂商是美国的罗宾斯(Robbins)公司和贾瓦(Jarva)公司、德国的沃斯(Wirth)公司和德马克(Demag)公司和瑞典的阿拉斯·科普柯(Atlas·Copco)公司;而软土掘进机则以日本川崎重工业公司生产的最为著名。到目前为止世界范围使用的掘进机已超过 470 台,掘进总长度在 4 500 km 以上。1993 年瑞典的阿拉斯·科普柯公司兼并了美国的罗宾斯公司,定名为阿拉斯·科普

1998 年 12 月 17 日收到初稿,1999 年 3 月 5 日收到修改稿,1999 年 5 月 6 日收到改定稿。

作者 张镜剑 简介:男,68 岁,1956 年毕业于清华大学水利系水工结构研究生班,现为教授,主要从事水工结构和岩土工程方面的研究与教学工作。

柯·罗宾斯(Atlas·Copco·Robbins)公司,成为国际上名列第一的掘进机制造公司。国外掘进机直径已达 14.14 m(用于日本东京湾跨海公路隧道)。现已研制出能开挖矩形或城门洞形断面的掘进机。此外,还研制出了能进行 27°~33°斜井施工的掘进机。

我国 1966 年生产出第一台直径 3.4 m 的掘进机,在杭州人防工程中进行过试验。70 年代进入工业性试验阶段,试制出 SJ55, SJ58, SJ64, EJ30 型掘进机。80 年代进入实用性阶段,研制出 SJ58A, SJ58B, SJ40/45, EJ30/32, EJ50 型掘进机,在河北引滦、福建龙门滩、青岛引黄济青、云南羊场煤矿、贵阳煤矿、山西古交和怀仁煤矿等工程中使用。但我国掘进机比国外先进掘进机相差 20 a,是国外 70 年代的水平,还需要加快步伐,急起直追。

自 1978 年我国实行改革开放以来,已有甘肃省引大入秦工程、山西省万家寨引黄工程和陕西省秦岭铁路隧道工程等项目引入国外大型 TBM 进行隧道施工,取得了成功,创造了月平均成洞 1 000 m 以

上的记录。

2 TBM 法施工

以下主要介绍岩石 TBM,并以山西省万家寨引黄工程总干采用直径为 6.125 m 的罗宾斯双护盾全断面掘进机为例。

2.1 TBM 的基本结构

TBM 由主机和配套系统两大部分组成,其设备的总长度达 150~200 m。主机用于破碎岩石、装载、转载。配套系统用于出渣和支护、衬砌、回填、灌浆等。主机由裁割机构(刀盘)、传动系统、支撑和掘进机构、机架、出渣运输机构和操作室组成。裁割机构(刀盘)是破岩执行机构。支撑和推进机构使 TBM 逐步式向前推进并给刀盘施加推力。机架由机头架、大梁及护盾组成。出渣输送机构运出岩渣,一般采用带式输送机。操作室内设有各种显示仪表和操作台等。TBM 主机图见图 1。

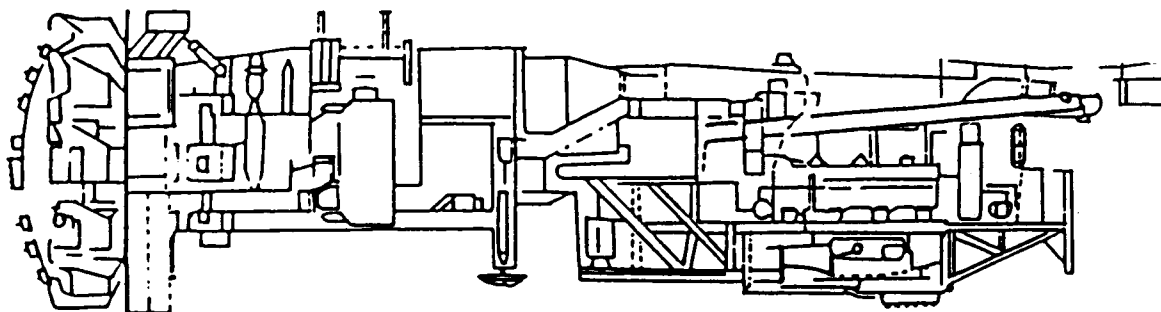


图 1 TBM 主机图

Fig. 1 The main engine of TBM

2.2 TBM 的配套系统

TBM 掘进工程面除必须的主机破岩外,还必须配备配套系统,通常称为后配套系统。包括运渣、运料系统、支护设备、激光导向系统、供电装置、供水系统、排水系统、通风防尘系统和安全保护系统。用于水工隧洞的还有注浆系统等,这些系统的部分设备、装置有的是安装在主机上的,有的是主机的组成部分。TBM 法与钻爆法相比,其主要优点是掘进速率快,所以配套系统是满足连续快速掘进的关键因素,其运输布置、运输能力、供水、排水流量、通风方式及风压、风量以及喷锚、混凝土管片安装、豆粒石喷射、回填灌浆的速度,必须与掘进速度相匹配。

2.3 施工前的准备

TBM 开挖隧洞必须在严格的施工组织设计指导下进行。在施工准备期间要完成场内主要交通道路,

在施工现场靠近洞口处平整出一块 TBM 设备组装机地,并建简易检修车间;建成风、水、电系统,送至主洞口附近,并备好通风管料;建成出渣线,落实弃渣场;建成生产能力与掘进速度相适应的混凝土管片生产预制厂。

2.4 TBM 的运输与组装

TBM 体积、自重都比较大(数百吨,乃至上千吨),一般都需要拆开运输。在工程承包合同签字后,承包商从订货制造、运输安装到开始掘进一般需要 9 个月到 1 a 的时间。

2.5 掘进作业

洞口开挖常用钻爆法进行。洞口形成以后,向前开挖一段隧洞,长度要大于掘进机刀盘到支撑后缘的距离,修平掌子面并将底板边墙衬砌好,即可进行 TBM 洞内安装并进行掘进。

TBM 开挖破岩是通过安装在机头刀盘上的多个

球形刀具旋转来完成的,弃渣由周边铲斗不停地铲起,通过漏斗和溜槽卸到工作面的皮带运输机上,再装入出渣列车运出。

掘进一个循环可分为2个阶段:

第1阶段为掘进阶段。首先,TBM后盾通过紧固装置,牢牢地紧固在隧洞中,而后驱动电动机在推进液压缸的作用下,带动刀头旋转破岩,切削前进0.8m(进尺深度),此时配套辅助设备均停留在洞内,出渣列车在皮带机底部接渣。在后盾的安装室,同时进行调运和安装混凝土管片(管片的安装是在完成两个开挖掘进循环 $2\times 0.8\text{m}$ 后进行的),并在安装好的管片背后和围岩之间充填豆粒石和灌浆。在掘进过程中,可控制推进液压缸的油量来完成掘进机的转向。

第2阶段为后盾和尾部设施延伸阶段。当刀头与前盾向前推进0.8m完成掘进,暂停工作后,前盾借助加紧装置固定在岩壁上,后盾则通过推力液压缸的反作用力,向前推进0.8m,后续列车由固定在刀头支架的一组特别牵引液压缸向前推进。在后续列车前移时,通过操纵相应的装置,自动延伸风筒、水管、电缆和轨道,至此即完成一个循环的破岩、石渣装运,延伸管线的工作。

2.6 洞内混凝土管片安装

根据围岩类别而选择管片型号。在专用弓形车上装运管片,应每组装侧、顶片和底板片。根据每组片数按规定顺序装车。管片运到掌子面后,由安装人员用机械手在掌子面吊运、安装管片。管片安装完毕便进行管片与围岩间豆粒石的充填。豆粒石充填后进行回填灌浆。

2.7 洞内运输和出渣

洞内采用轨道(单轨道)式运输,轨距1000mm,固定在已经衬砌的底拱上。洞内每隔3km布置一个错车平台,错车线60m。距离装渣口100m处,有一个固定错车平台,经常停放一列准备进掌子面的装渣车。每列13节,其中7节为 8m^3 装岩车,能满足装TBM两个行程 $2\times 0.8\text{m}$ 的渣量。4节装运管片的弓形车,也正好是1.6m的衬砌量。另2节是装豆粒石和水泥的。按TBM掘进的速度,每进尺1.6m,平均26min即每隔26min必须有一列车开入工作面。

2.8 通风与除尘

采用压式通风,风机串联安装。用PVC风管,悬挂于拱顶,风阻及漏风系数小,通风效果好。

2.9 引黄工程TBM施工及其质量问题

山西省万家寨引黄工程总干采用了一台TBM,已完成施工;南干采用了4台TBM,正在施工。根据总干这一台TBM施工情况,其掘进速度平均每日

25~30m,能达到预期要求。一般情况是TBM在启动后,第一个月达到正常掘进的10%,第二个月达到60%,第三个月达到90%。但是,引黄工程TBM施工中出现的的质量问题有:操作不熟练使管片错台大于5mm,有的达到2~4cm;液压推力不均匀使管片环向边缘上局部被压裂;土洞段因机头自重大,产生沉陷,不能保证设计坡降;后盾的后底部仅有局部开口,使地质编录难以进行;顶拱处豆粒石难以充填满,不能做好灌浆;掘进速度快,管片难以根据推进油压缸推力的大小及时调整管片类型等等质量问题。这些问题都有待研究和改进。

3 TBM 设备费用和成洞造价

当采用TBM施工时,需要向厂家订货。若采用双护盾伸缩式TBM和管片衬砌技术,设备费用可按以下方法估算。

TBM主机费用=直径(m) $\times$ 100万美元。

配套系统费用100万美元;管片预制厂费用100万美元。此外,尚需另加进口配件费用、技术协助费用、海关税、运费等。

山西省万家寨引黄入晋工程总干6#,7#,8#隧道内径为5.6m,成洞造价12500元/m(1997年)。甘肃省引大入秦30A隧道内径4.8m,其成洞造价为5600元/m(1992年)。

4 TBM 的几个技术问题

4.1 超前地质探测问题

由于长隧道在施工前的地质勘查不可能做得十分详尽,因此常常在施工中出现一些不可预见的地质灾害,例如涌水、岩溶、瓦斯、断层、膨胀岩、高地应力及围岩大变形等。我国在60年代修建的成昆铁路全线共有415座隧道,其中发生涌水问题的占93.5%。在危地马拉的Rio Chixoy水电站的27km长的供水隧道中,因遇到岩溶,一台TBM被埋在一个侵蚀洞穴里。委内瑞拉Yacambu隧道长27km,其围岩收敛变形每分钟达到20cm,致使TBM无法完成掘进而停工。因此,TBM在掘进过程中,必须有超前地质探测的保证。

TBM在掘进过程中,通常每天在停机维护的期间,用多方向支撑液压钻机进行超前钻探,预测可能影响掘进的问题或异常现象。但一般超前钻探约20~30m,TBM掘进速率每天超过20~30m时,则不能满足预测的需要。

在70年代末,美国科学家发明了地下雷达(又称地质雷达或探地雷达)。80年代以来,逐步臻于完

善,进入了实用阶段^[1]。我国于 90 年代研制了 PEIR-9001 型矿用本安型探地雷达和 TL-1A 型探地雷达。TL-1A 型探地雷达^[2]已应用于堤坝白蚁巢和鼠洞、灰岩溶、坝体内和水库底的空洞、灌浆质量和体坝浸润线位置等的各类水利工程隐患的探测。

地下雷达的基本原理是通过地面发射天线将宽频带超高频脉冲电磁波送入地下,经地下地层或异常体(洞穴、液面等)反射回地面,由接收天线接收。然后,对反射回的电磁波进行数据资料处理,便可得到地下地质特征信息的图象。现有规格的地下雷达可靠探测深度一般在 60~100 m 以内,可靠分辨率为 0.1~0.5 m。

法国巴黎 Eole 工程在 TBM 掘进过程中利用地下雷达进行了超前探测^[3]。该工程共进行了 12 组雷达搜索,总长 577 m,径向范围为钻孔周围 5 m 范围内。地下雷达探测获得了以下 3 方面的信息:低非均质雷达区,指示减压区、低密度泥灰岩;局部能量反射,指示有石膏体、水囊或空穴存在;光点,说明可能存在破碎带或界面变化。掘进过程证实了雷达结果。地下雷达的主要优点在于可准确探测到 TBM 前方的具体地质困难及其位置,以便及时采取有效措施进行处理。今后地下雷达必将在 TBM 施工中发挥重要的作用。

4.2 长隧道工程质量的检查验收问题

TBM 施工长隧道具有快速高效的特点。但是,对这些长隧道施工质量检查验收通常利用回弹仪、钻孔抽查等常规手段来实现。这些手段不能对隧道全线的工程质量作出全面完整可靠的检验。瑞士安伯格测量技术有限公司研制出 TS360 型系列隧道扫描器^[4]满足了隧道全线工程质量检测的需要。其中的 TS360BT 型隧道扫描器能测绘出衬砌表面后的缺陷。此仪器的工作原理是:洞内的空气和岩体之间存在一个温差,衬砌的物理特性受衬砌中空洞、衬砌与岩石间填充料的密实和衬砌后面的渗水的影响,衬砌物理特性决定着多少热量通过衬砌传导,热的差异能使衬砌表面温度与衬砌质量状况之间建立一定的相关关系。因此,测量衬砌表面的温度微小差异就可以检测出衬砌质量的好坏。此仪器安置在动载车上,以 2~4 km/h 的速率沿隧道前进,仪器上的扫描镜呈 360°旋转,于是扫描器记录下隧道沿程一条螺旋线上的温度差异的信息。经过对记录下的信息资料的数据处理,便可了解到衬砌质量的状况。此仪器已被多项隧道工程用来进行质量状况的检测,例如瑞士的 Baregg 隧道(1990 年)、苏格兰的 Inver 隧道(1991 年)、苏格兰的 Saltwood 隧道(1992 年)、瑞士的 Fuchsenwinkel 隧道(1993 年)和法国的 St. Germain 隧道(1994 年)。可以预见隧道

扫描器将在长隧道 TBM 施工质量检测中得到进一步的应用。

4.3 长隧道中 TBM 施工的安全问题

TBM 在长隧道中施工,万一发生事故,施工人员是难以迅速撤离出洞的。因此,TBM 必须配备可靠的安全保护系统。总的来讲,TBM 施工的事故远比钻爆法小^[5]。例如,TBM 法施工的长 49.2 km 的英吉利海峡隧道事故死亡 10 人;而钻爆法施工的长度与英吉利海峡隧道相近的长 53.9 km 的日本青函隧道死亡达 34 人。

TBM 施工中发生水、火灾害的风险不大,但是丹麦 Great Belt 工程^[3]隧道 4 台 TBM 在施工中就遇到了罕见的水、火灾害。1991 年 10 月 14 日在该工程西面掘进的两台 TBM 中的南线 TBM 工作面,发生严重的涌水事件,在没有任何前兆的情况下,海水突然冲破了约 12 m 的覆盖层,进入了机体,涌水形成了洪水,冲坏了西南的两台 TBM。后来又在 1994 年 6 月 11 日该工程东面的一台 TBM 发生了严重的火灾,TBM 驱动刀头的 12 台液压马达中的一台的液压管路被烧断,喷油着火,烧毁了该台 TBM。幸运的是这两次事件均未造成人员伤亡,特别需要指出的是严重的火灾持续了 17 h,周围温度高达 700℃ 左右,先进的防爆系统和安全保护系统自动启动,防爆紧急电源开始工作,自动氧气罩的供给,保证了施工人员的安全撤离。这个实例强有力地说明了 TBM 施工必须有可靠的安全保护系统,同时也充分地说明只要采用了可靠的安全保护系统,TBM 的施工安全是可以得到保证的。

5 展 望

从全球角度出发,由于人口的不断增加,导致资源日趋短缺,生存环境不断恶化。因此,人们逐渐着眼于地下空间的开发利用。例如,随着欧洲联盟各国的政治经济一体化,运输系统的运输能力需要迅速提高,预计在今后 20 a 里运输量将翻番,而阿尔卑斯山脉为欧洲南北运输筑起了一道天然屏障,大部分货物只得通过高速公路由汽车运输,造成环境问题(当地自然条件的破坏、大气污染和噪音等),使居民越来越无法忍受。为此,计划从 Rosenheim 穿过阿尔卑斯山脉至 Verona 修建一条自动化地下货运铁路线,按双洞单轨布置,单洞总长大于 500 km。

世界人口的增加,又促使各国大力发展经济,提高生产,导致大量的物资交换和文化交流。这必将推动长隧道的修建。在国外拟建的长隧道有:法国 Lyon 至意大利 Torin 的长约 54 km 的隧道;西班牙

牙与摩洛哥之间穿过直布罗陀海峡的长约 50 km 的隧洞; 连接亚洲与美洲的长约 90 km 的白令海峡隧洞; 南非莱索托高原水利工程 6 条隧洞总长 200 km。在国内除已在前面提到的南水北调西线最长的 131 km 的隧道以外, 还计划有: 渤海海峡隧道长约 57 km; 琼州海峡隧道长约 30 km 以及祖国实现统一后的台湾海峡隧道等。

上述这些巨大的隧道工程要求不断完善 TBM, 使之能更好地满足工程建筑的需要。首先, 要求 TBM 能更适应不利的地质条件。例如, 上面提到的穿越阿尔卑斯山脉单洞总长大于 500 km 的铁路隧道, 其覆盖深度达 1 200~2 400 m, 围岩初始应力高, 围岩径向变形可能在 10~20 cm 范围内, 在某些极端情况下, 可达 30 cm, 甚至更大, 要求 TBM 的开挖直径是可变的。此项工程开挖直径约 8.5 m, 共需 20 多台 TBM 同时在不同的围岩中掘进。因此, 对 TBM 应进行专门的设计以满足开挖直径可变的要求。这样从发展趋势来讲, 将趋向于两极化。这就是既要设计能适合复杂地质条件使用的、费用高的多功能 TBM, 又要生产用于地质条件简单的、廉价的 TBM。其次, 目前公路隧洞因多车道的需要, 要求大断面。3 车道或 3 车道以上要求路面宽至少大于 20 m, 有的甚至达到 30 m^[3]。直径达 20~30 m 的 TBM 正处于“预研究”阶段。预计今后 TBM 将更大直径化^[6]。因此, 大直径 TBM 的设计制造和部件运

输组装是其技术上的主要趋势之一。第三, 未来的发展方向之一是全自动化 TBM。第四, 由于计算机硬件和软件的迅速发展, TBM 计算机优化设计和施工系统的开发也是发展方向之一。第五, 目前主要用于工业和民用管道施工的微型 TBM 发展很快。微型 TBM 技术水平日本居世界首位, 其次为西欧。至今全世界采用这一技术修建的微型隧道(直径 25~300 cm)已达 5 400 km^[7]。

总之, TBM 已在全球得到越来越多的应用, 其技术水平日益得到提高。展望未来, TBM 发展前景将是宽广而喜人的!

参 考 文 献

- 1 张镜剑. 地下雷达及其在岩土工程中的初步应用. 见: 河南省岩石力学与工程学会第八次学术研讨会论文集, 郑州: [s. n], 1996
- 2 吴 晋. 各类水利工程隐患的探地雷达影像识别与分析. 水利水电技术, 1998, (8): 25~31
- 3 “TBM 隧洞施工趋势”国际研讨会文集. 奥地利: HAGENBERG, 1995
- 4 TS360 Tunnel Scanner. Amberg Measuring Technique Ltd., Switzerland
- 5 海峡隧道. 中国水利水电长江葛洲坝工程局翻译
- 6 和佐勇次郎. 日本盾构施工法之现状. 土木技术, 1991, (10): 56~64
- 7 傅冰俊. 国际地下工程发展动向. 岩石力学与工程动态, 1996, (2): 3~4

THE APPLIATION AND SOME PROBLEMS OF TBM AND ITS PROSPECTS

Zhang Jingjian

(North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450045)

第六届全国岩石动力学学术会议在昆明召开

第六届全国岩石动力学学术会议于今年 6 月 7~15 日在云南昆明召开。这次会议内容为:

- (1) 岩石动力学学术交流;
- (2) 评选优秀论文并颁奖;
- (3) 举行岩石动力学专业委员会会议并换届;
- (4) 考察岩土工程与自然景观。

(摘自该会议通知)