高性能隧道掘进机领域的最新发展

（瑞士）G.Girmscheid 著　叶定海 译

1　概论

隧道掘进机（以下称 TBM）的应用在很大程度上受有关费用和期限等经济因素的约束，隧道工程的最短长度以及总投资在项目中的折旧对于经济地应用 TBM 是很重要的。不可能确定隧道掘进机施工的固定最短长度，这取决于工程的特定的边界条件，然而将来几百米长的隧道还会用传统的方法开挖，因此 TBM 应用的合理起始长度约 2km（决定于机器直径）。

隧道开挖中对经济性的要求，导致将 TBM 应用于特别不易处理的地层中，但 TBM 系统处理变化的地质条件的能力是有限的，所以对每个工程来说需要仔细解决下列技术问题：

地层的可开挖性；TBM 在地层中的支撑能力；地层的稳定性和可变形性。

为使技术和经济风险最小，必须沿着隧道洞线仔细进行勘测。机器及其后配套系统必须适合于整个范围内最可能碰上的地层条件。

使用 TBM 进行全断面挖掘仅可以开挖圆形断面，开挖形状准确且在岩石上平缓进行。目前，TBM 施工直径从 2.5～12m，TBM 具有各种不同系统形式，包括：支撑式 TBM；扩孔式 TBM；护盾式 TBM；双护盾 TBM/双护筒 TBM/支撑盾壳 TBM。

支撑式 TBM 和扩孔式 TBM 属于敞开式全断面支撑型机器，适于所有地层，在刀盘后安装支护拱架所需的持续时间最小。喷浆应在后配套部分进行以避免引起可移动的液压装置的磨耗。在易坍塌的地层条件中，支撑式 TBM 刀盘油缸后的部分易被埋入。通常必须采用复合手段，即地层需通过附加的侧边巷道进行加固，而被埋机器必须用手工恢复自由状态，这意味着施工进程将会损失几个月。

在有膨胀压力的纯地层中护盾油缸会变得困难，在缓慢变形过程的地方，这个问题可用超挖工具解决，使开挖直径比护盾直径更大（支撑式 TBM 的防尘护盾或护盾式 TBM 的盾壳）。然而在很多情况中，对于这样的地层条件，采用传统的开挖方法更好。

扩孔式 TBM 系统提供了进一步的技术选择，该系统由两个分开的机器组成：一台支撑式导洞 TBM 和一台扩孔 TBM。这两台机器用于不同的时间，首先用支撑式导洞 TBM 沿隧洞的整个长度开挖一条导洞，然后再用扩孔 TBM。扩孔 TBM 有一推进支撑系统，用支撑板将机器自身撑紧在先前挖好的导洞上，后配套则跟着扩孔 TBM。

2　地质技术在 TBM 上的应用

TBM 适用于开挖平均强度至高强度的硬岩（50～300MPa），但磨蚀性不能太高。磨蚀性与高硬度的材料如石英使刀具承受异常的磨损有关。

2.1　支撑式/扩孔式 TBM

支撑式 TBM 用于在稳定和无断层的地层中开挖巷道和隧道。通常规定隧道总长约 80%～90%必须主要是稳定的，因此机器区域仅需作有限的支护。岩石抗压强度应在 100～300MPa 之间，岩石强度超过 350MPa、高硬度或高拉伸强度及含高磨蚀效应的材料是经济界线。为了评估是否可应用，也可用岩石劈裂强度和 *RQD* 指数来衡量。岩石劈裂强度应为 25 ± 5MPa，*RQD*（Rock Quality Designation 即岩石质量标志）指数表示地层的分离度，可描述为 L_{10} 比 L 的百分比。

$$RQD = \frac{\sum L_{10i}}{\frac{n}{L}} \times 100\%$$

式中：L_{10i}——超过 10cm 的钻掘岩心样本长度之和；

N——超过 10cm 的钻掘样本数量；

L——钻掘段长度。

若 *RQD* 指数为 50% ～ 100%、裂隙大于 60cm，首选支撑式 TBM 是正确的。在岩石分离度较高的情况下稳定性可能成为一个问题，地层强度若小于 100MPa 将会限制撑靴的支撑能力进而限制

最大推力。通常，机器装有较短的防尘护盾。

2.2 护盾式 TBM

岩石强度大致和支撑式 TBM 的情况相同，然而岩石的边界强度大为减小，在裂隙为 55～65cm 和 *RQD* 指数为 50±10%时变得更加明显。甚至在相对较低的单轴岩石抗压强度（50±5MPa）和较低的岩石劈裂强度（5±0.5MPa）下，也能采用护盾式 TBM。在地层易坍塌的场合，护盾式 TBM 将显示其合适的运行解决方案。在将来尤其是在较大直径场合下，带有盾壳内管片安装的护盾式 TBM 或双护盾 TBM 必定会得到重视。

3 支撑式掘进机

典型的现代支撑式 TBM 的结构可分为开挖、支护和驱动组合体与运输和装配设备两部分。

刀盘属于掘进机第一组合体，由液压马达或电机驱动，通常沿中空主轴承周围以环形模式布置在机器的轴上。带防尘隔层的刀盘罩将刀盘与被开挖掌子面隔开，刀盘罩可保护刀盘，防止物料侵入；防尘隔层防止灰尘和碎屑进入刀盘后面的工作区。岩碴通过刀盘上的铲斗装置和刀盘后面的导向板运到刀盘中心，在那里岩碴落进漏斗，送到运输机上，运输机通常置于机器的中心轴位置。选用液压驱动马达时，驱动液压泵站的电机安装在后配套上。掘进头的推进力由一支撑推进系统提供，支撑推进装置可由两个主要系统来区别：

（1）单水平支撑面倾斜推进油缸的支撑推进系统，与内机架和外机架支撑垫相连。

（2）双支撑面、水平或 X 型撑靴布置、带有纵向水平推进油缸的支撑推进系统，与内外机架相连作为反作用系统。

在困难和不稳定岩石中，上述系统的优点有：

（1）特别是在困难的破碎岩石中，单平面支撑系统允许掘进头罩/防尘隔层和支撑面之间有更多的空间进行临时岩石支护。这种布置方法的长度约为一个护盾直径，钢拱架及其架设装置、一台或两台装在旋转和纵向移动装置上的钻机都布设在这个区域内，这样可在掘进期间进行安装钢拱架和岩石锚杆。护盾油缸通常在防尘隔层后面伸出，以使在有栅条空隙的洞顶护盾下立即安装锚杆。锚杆安装器有岩石塌落保护室以保护操作员。然而从理论上说，单平面支撑系统在水平层状且有不同抗压强度的岩石中较难于控制方向。

（2）双平面系统允许掘进头罩/防尘隔层和第一支撑平面之间有 0.5 个护盾直径的长度，以便安装上述的临时岩石支护。虽然也可以安装同样的设备和装置，但由于减小了临时支护的空间，在困难破碎岩层的驱动速度可能受有限空间的约束，因而掘进速度较慢。但是由于有两个支撑平面，在水平层状岩石中其方向可控制性非常好。在岩石条件为软硬岩变化的垂直岩层时，双支撑平面有更大的灵活性，可提供足够的支撑力以提供充分的推力。

第二组合体和设施用来在工作面或 TBM 防尘护盾后面进行即时支护措施，并进行地层预探测。进行初期保护性支护措施包括直接在刀盘罩后面架设支护拱架和以挂网、洞顶锚杆或喷浆的形式进行洞顶区域的巷道保护。

除了这些机械和液压安全辅助设备外，还需物料运输设备将支护拱架从位于 TBM 后部的中继存储站运至安装地点。需要一台可移动钻臂用来勘测工作面并给工作面注浆，该钻臂装在外机架上，可通过环形支架径向定位，以在圆周内任何所需位置进行钻进。在极破碎松散岩层，可使用这些钻进和注浆设备进行扇形预注浆，以防止机器后面的坍塌。这些设备通常只适用于保证小型扰动区的安全，因为与其相关的必要的特殊措施极其费时。支护系统在机器后面约 15m 的后配套上以机械方式进行系统的安装，但采用传统方法如拱架、洞顶锚喷等。如果必须通过有冒顶的大面积断层区，则使用带管片衬砌的护盾式 TBM 可能更合适。

如需使用基础仰拱块，可通过装在后配套支护平台上的液压驱动运输/升降装置临时存储（非连续性供货），并根据掘进速度进行铺设。铺设时需在外机架后段下部，将基础仰拱块用液压升降运输装置运送至外机架下侧的安装器（在外机架后段下部进行）。安装器装有中心销轴和真空吸板，可放置基础仰拱块。通常基础管片用作后配套轨道。

开挖工作面过程会产生小颗粒岩碴及相应的粉尘，因此，需要配置设备以限制粉尘发展，并在粉尘与空气混合之前将其排走。处理粉尘方法：

（1）刀盘后面的防尘护盾、刀盘上的排尘口和后配套上的除尘；

（2）在靠近刀盘的工作面喷水。

装在机器上的除尘管将粉尘从刀盘罩处排走，

送进除尘设备，通常该设备装在后配套系统上。

3.1 刀盘

对付坚固的岩石，通常选用封闭的装有盘形刀具和刮板槽的岩石刀盘。刀盘作为刀具的刀架，其朝向工作面的前端通常稍呈锥形，大体上构成了封闭的基础结构。为了确保刀盘足够坚实，同时又不采用可能导致内部应力并进而产生裂缝的过厚的材料，刀盘通常由一个锥形筒状元件构成，内部通过径向布置的导向板使其得到加强。这些导向板在刀盘内形成锥形腔室，松散的岩屑通过径向布置在刀盘上的刮板形成的刮板槽，由导向板将岩屑引导至中空支承的刀盘中部，再送进机器的运输机排碴漏斗。刮板装置的刮板槽应尽可能位于中心位置，这样，可防止松散岩屑滑过整个掌子面上所有的刀具。如果刮板槽只装在边缘，切割速度会下降，因为松散岩屑在切割轨迹上慢慢流动，其结果会形成粉核垫层从而阻止盘形滚刀的切割深度。

切割滚刀架设置于刀盘前板的基础结构上，盘形滚刀或切割滚刀由装在刀盘后侧的刀架支承。切割滚刀刀架要设计成既可在刀盘前面又可在刀盘后面换刀。部分换刀工作可用液压工具完成，以简化必要的维修工作并节约时间。通过在刀盘板后侧上安装切割滚刀刀架，可将工作面和刀盘之间的自由间隙减至最小。这样，盘刀和刀架承受较少应力，可极大地排除滚落下来的石块卡住刀盘或者切割滚刀刀架被弄坏的危险。

工程技术各方面几乎完全限定了刀盘轴承，通常使用下列类型的轴承和驱动：

中心轴轴承；环形轴承；中空组合轴承。

中空组合轴承一般用于支撑式 TBM，其优点是可在刀盘的正中央通过运输机进行排碴，可引导开挖岩碴通过。此外，管线和软管也都由旋转传送引导通过这点，进到刀盘内部的入口也在此处。

入口通常在内机架下侧的开口处，进入时要求机器的皮带运输机回缩。位于防尘隔层后侧的入孔直径 60cm，用作进入刀盘内部的另一个入口。到达掌子面的其它入孔在刀盘的前板中，切割滚刀刀架也可提供至掌子面的入口。此外，由于中空主轴承中心具有足够的空间，可沿圆周布置多台液压马达或变频电机，向刀盘驱动齿圈传递工作扭矩。液压马达通常直接安装在主轴承上，而变频电机则是安装在内机架的末端，驱动力矩通过机架传给主轴承。当刀盘突遇较高阻力时，驱动杆的扭转刚性为马达提供了一定程度的弹性。

3.2 刀盘驱动及主轴承

为保证顺利掘进并根据地质特性进行最佳调节，平缓启动刀盘和进行无振动操作是很重要的，所以 TBM 大都装有无级变速液压马达或变频电机。该驱动装置能由人工切换到旁路作业，其瞬时爆发扭矩可相当于额定扭矩的 1.5～2 倍。驱动控制必须能防止机器部件过载，并可双向旋转，便于维修作业，且刀盘靠安全闸确保安全。

刀盘的驱动可采用下列方法：

带摩擦离合器的电驱动，通常有两个不同的速度；电驱动—变频控制，变速；液压驱动，变速；电驱动，带辅助液压驱动用于高起动扭矩。

电驱动一般配有两个速度级，要求启动扭矩约为工作或驱动扭矩的 1.5 倍。启动扭矩受时间限制，首先启动所有电机，而后离合器动作，刀盘制动松闸并开始旋转，或者安全滑动离合器释放电机，电机的效率约达 95%。带变频控制的电机以多种方式运转，可达到启动扭矩 1.7 倍的瞬时启动扭矩。通过热开关调节驱动扭矩以防止电机受损，并限制刀架上的应力。为实现刀盘的强行脱困，变频电机可从静止状态提升至全动力状态，效率约为 90%。液压马达因其简单和结实耐用而频繁使用，可实现极高的启动扭矩，即达到额定转速时驱动扭矩的 2～2.5 倍。在转速较低时，驱动扭矩可达到额定转速扭矩的 1.5～1.8 倍。然而其效率只能达到 75%。在常用的双速电驱动时，再用一小型辅助液压马达，当速度很低时其爆发扭矩可增至驱动扭矩的 1.8～2.2 倍。

电机的优点是能源利用率高，考虑到 TBM 的能量消耗极高，因此在其整个使用期间均可得到体现，而且目前新电机的售价也不比液压马达高很多。电机只能由称职的工作人员来维护，对变频电机尤其必要。液压马达则结实耐用且易于维护，还可得到极高的启动扭矩，其维护作业在正常情况下只需更换软管或密封。隧道内泵和电机周围产生相对较高的热量，会导致低效率，此外，能量成本也高于等量输出的电机。

变速对直径很大的机器具有优势：对不同的岩石和地层条件，可通过每分钟转速的改变进行最佳调节；可控制启动扭矩和机器振动。变频电机和液

压驱动均可满足这些条件。

如果要通过包括若干断层的稳定地层，可以采用带有辅助液压驱动的电驱动，以便在出现意外时能得到高启动扭矩。此外，刀盘的掘进速度和接触压力应可无级调节，以便与最佳工作驱动扭矩结合，取得最有效的岩石松散过程。而最有效的地层松散过程说明是最经济的掘进速率、最佳地利用掘进刀具。在挖掘期间，刀盘平稳转动。通常刀盘有一个圆形或方形的盘心，并根据相关工程安排周围的外接块，这样TBM可制造成一个直径范围。如果要改变直径，只需调整外接刀盘块、盾壳以及防尘护盾，而驱动、稳固和推进组合体必须适应最大直径。

一般情况下，TBM 主轴承由一高性能轴向径向滚子轴承组成，用以承受刀盘载荷。多道唇形密封和局部润滑脂从轴承前内侧和外侧保护油腔。油从各个油腔流送至配有电磁铁的有压过滤器，并由热交换器将油冷却，然后清洁的温控油在压力下再循环到主轴承周围（可控供油）。装在润滑系统和刀盘驱动组件之间的一个闭锁装置用来防止机器的无润滑运转。

3.3 刀盘护罩

刀盘护罩装在旋转的刀盘周围，在外刮板区域。护罩用于在任何可能坍塌的地层保护刀盘，进而防止刀盘被卡住。护罩与其后侧的防尘护盾相连，常被用来引导辅助设备以安装钢拱架，或用来在防尘隔层后面进行顶部保护。刀盘护罩底部也被用作机器撑靴重新定位期间 TBM 的前支承和掘进期间额外的刀盘支承。刀盘护罩组成一楔形刀具，该钢结构由锥形板和肋板组成，刀盘护罩的楔形截面同时用来清理洞底（推送岩碴）。由于提供了额外的稳定性，也减少了机器的振动。因岩石条件（挤压地层）的需要，刀盘护罩由独立的几块和正交布置的液压油缸组成，径向行程达 50～200mm，从而可改变外径。可保证机器不因地层下沉而被卡住，及在机器处于停机状态时可再次解脱。

3.4 带支撑推进装置的内/外机架

内机架包含一个搁在外机架滑道上的箱形结构，形成支撑式 TBM 的中央导向元件。推力从外机架通过推进油缸传到内机架，前内机架区主要放置辅助设备，如安装支护钢拱架的设备，后内机架区包含 TBM 后支承。大多数情况下，内机架中间放置液压或电驱动的带式运输机，皮带可全部卸下进行维修，它从刀盘漏斗处接住已开挖的岩碴，再送到后配套运输机上。为了在处理岩碴时进行清理，要求橡胶带式运输机可以收缩和加长。

外机架可由一个或两个分开的箱形结构组成，在不同安装钢拱架支护时可选用刚性箱形结构，如果需要连续钢拱架支护，从操作上来说则可采用两个分开的箱形结构，它可通过改变两个外机架箱形结构间的相对距离，从而改变两个支撑面互相之间的间距，来补偿钢拱架安装的不精确性。

当钢拱架安装较近时，必须将支撑板分成两个分开的撑脚，其间隔比支护所用钢拱架的宽度大，以使支撑不用完全取决于钢拱架支护，并不致损坏。支撑装置由下列零件组成：

支撑板（支撑夹，支撑垫）；两个支撑油缸；用于承受和传递扭矩与推力产生的侧向力的可伸缩导向块。

TBM既可纵向支撑，又可在一个或两个平面上支撑，在横截面上，支撑方式可以是水平的或者是 X 形的。目前双 X 形支撑采用最多，以保证在不同硬度和强度的、变化的分层岩石中掘进期间位置的稳定性，以及当机器直径≥4.00m 时可节约空间。

推进部件一般分成两个压力油缸组，以确保将推力安全地传到单外机架结构或两部分外机架结构上，并使结构紧凑。其一端和内机架相连，另一端则连在外机架上，掘进行程在推进油缸处测量。在两个分开外机架的场合，当处于低强度地质条件的局部断层时，其中每一个都能用相应的支撑油缸和推进油缸单独驱动。随着掘进行程的结束，机器放下前后支承，推进油缸必须回缩至起始位置。后内机架周围是一机座，在重新定位时用液压支架支承在洞底上，在此期间，内机架位于该机座的垂直油缸上。在支撑松开时，TBM 的后端通过垂直油缸提升或降低，水平油缸则将 TBM 后端移向两侧，这些调整用以控制下一掘进行程的方向。

内机架的刚性导向具有下列优点：

在硬岩中可容易地传递高接触应力和推力；支撑力可分布于数个洞壁冲击点，以适应不易处理的地层条件。

内机架的刚性导向可防止在掘进过程中产生刀盘位置偏差。（未完待续）

G.Girmscheid，Swiss Federal Institute of Technology，Zurich，瑞士

叶定海，Wirth 公司北京办事处，100028　北京三元桥中旅大厦 1819 室