

# 深埋、复杂地质条件大直径隧道 TBM 的设计进展与创新

Remo Grandori

(SELI S. p. A. 公司, 意大利 罗马 1-00144)

**摘要:** 要提高在深埋、复杂条件下大直径隧道 TBM(隧道掘进机)的应用效率,必须正确选择 TBM 的类型。为了给复杂条件下 TBM 的选型提供借鉴和指导,总结现有的各类型 TBM 的特点,分析其在混合地质条件下开挖大直径、长距离隧道的局限性,提出不同地质条件下大直径隧道 TBM 选型指南,介绍意大利 SELI 公司开发的 3 种新型 TBM,即紧凑型双护盾通用 TBM(DSU Compact TBM)、土压平衡双护盾通用 TBM(DSU EPB TBM)和土压平衡单护盾通用 TBM(SSU EPB TBM)及其运行特点和适用范围。得出结论:传统 TBM 没有专门针对复杂地质条件下的大直径隧道的研究与设计;为满足市场需求,必须开发新型 TBM;意大利 SELI 公司开发的 3 种新型 TBM,每种专门针对特定的地质条件,这些新型的 TBM 能够应对复杂的地质条件,并能克服在不同覆盖层下开挖长隧道时的最常见危险。

**关键词:** 大直径、长距离隧道;隧道掘进机(TBM);撑靴式敞开 TBM;双护盾 TBM;单护盾 TBM;敞开模式;双模式;紧凑型双护盾通用 TBM(DSU Compact TBM);土压平衡双护盾通用 TBM(DSU EPB TBM);土压平衡单护盾通用 TBM(SSU EPB TBM)

**DOI:** 10.3973/j.issn.1672-741X.2012.01.001

**中图分类号:** U 45

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-741X(2012)01-0001-04

## TBM Design Developments and Innovation for Large Diameter Tunnels under High Cover and Complex Geologies

Remo Grandori

(SELI S. p. A., Rome 1-00144, Italy)

**Abstract:** Right type of TBM should be chosen so as to improve the construction efficiency of TBM boring in large diameter tunnels under high cover and complex geologies. The characteristics of the existing TBM types and their limitations for large diameter and long tunnels under mix conditions are presented. A general guideline for the selection of the proper type of TBM under different conditions is made. The 3 pilot innovation projects developed by SELI are presented, including DSU Compact TBM, DSU EPB TBM and SSU EPB TBM. Conclusions drawn are as follows: Traditional types of TBM are not specifically studied/ designed to bore large diameter tunnels in complex geologies; To satisfy the market demand, new types of TBMs should be developed; 3 new types of TBM developed by SELI are specifically suitable for a certain geological range, and these new types of TBM allow coping with complex geologies as well as overcoming the most common criticalities that might be encountered when boring a long tunnel under variable cover.

**Key words:** large diameter and long tunnel; tunnel boring machine (TBM); open gripper TBM; double shield TBM; single shield TBM; open mode; dual mode; DSU compact TBM; DSU EPB TBM; SSU EPB TBM

### 0 引言

在过去的 20 年里,市场经历了 TBM 隧道掘进机生产和应用数量及尺寸/直径的激增,而 TBM 在种类和新技术方面没有多少重大改进。缺乏创新导致 TBM 在一些重要的隧道工程应用中屡次失败。在未来几年内,全球有一些新的铁路和公路项目即将投入建设。这些项目大多包含地质条件复杂、不同埋深的

长距离、大直径隧道,需要采用 TBM 施工。重大水电站项目,尤其是在印度和中国,也需要开挖长距离、大直径的隧道。为了有效地开挖这些隧道,隧道界不得不研究新技术和新型 TBM 以灵活应对不同的地质条件,而且还要有不同的操作模式以满足这些隧道开挖的需求。本文介绍已经实施的设计开发成果,并提出即将实施的新技术的设计指南。

收稿日期: 2011-11-21

作者简介: Remo Grandori(1960—),男,1984 年机械工程专业毕业,毕业论文是关于 TBM 机械挖掘方面的。自 1984 年起,一直在意大利 SELI 公司工作,现任 SELI 公司总裁。在他指引下,SELI 公司开发了众多的新技术和 TBM 新设计。

## 1 现有的 TBM 类型及其在混合地质条件下用于大直径隧道开挖时的局限性

TBM 在混合地质条件下开挖大直径长隧道的基本前提是能够应对不同类型的岩土地层。要满足这种基本要求,需要更慎重地进行 TBM 选型研究,同时应以开发新技术和新性能为重点。目前,现有的 TBM 类型及其主要运行特点可概括如下。

### 1.1 撑靴式敞开 TBM

该类 TBM 在坚硬而稳定岩石中掘进时可达最大工作效率,但当围岩不稳时,其工作效率会大大降低。该类 TBM 对岩石/隧道的稳定性要求极高,因而不适合多变地质条件下的长隧道开挖,尤其是开挖直径超过 6~7 m 的隧道。其原因是:在大直径隧道中,即使是岩质不错,由于围岩的不稳定,在掘进的冲击下致使大量岩块和岩屑坠落,对施工人员的人身安全会造成威胁,且需要花费大量时间和成本来清理这些碎屑;此外,这些近乎系统性的不稳定因素需要安装很有效的临时支护(如锚杆、喷射混凝土或钢拱架等),这也会耽误 TBM 的掘进进度。撑靴式敞开 TBM 在不良围岩中开挖大直径隧道已经达到了应用极限,由于在刀盘支撑之后立刻需要强大的结构支撑,撑靴的支撑作用引起更大程度的失稳,导致撑靴支撑困难;另外,撑靴式敞开 TBM 只能安装 NATM(新奥法)初期支护,需要再进行二次衬砌,这都必然会增加成本、延长工期。

表 1 为近期撑靴式敞开 TBM 在大直径隧道开挖中的应用实例,可明显看出其面临的巨大挑战。

表 1 撑靴式敞开 TBM 在大直径隧道中的应用实例

Table 1 Application of open gripper TBM in the excavation of large diameter tunnels

国家	隧道名称	应用效果
加拿大	尼亚加拉(Niagara)隧道	采用 14 m 直径开敞式 TBM, 行进非常困难, 日平均进度极慢, 导致工期延迟数年 and 极高的额外成本
瑞士	Gottard Boido Faido 隧道	穿过硬岩掘进, 由于岩石塌方以及支护安装停工, 只达到预期进度的 50%
中国	锦屏隧道	采用 2 台大直径开敞式 TBM, 无法完成隧道开挖, 最后通过钻爆法得以继续
西班牙	高速铁路隧道	采用开敞式 TBM 提前掘进, 无法完成施工, 最后不得不采用传统方法得以完成

### 1.2 双护盾 TBM

在混合岩地层开挖中小直径、长隧道, 双护盾 TBM 通常是最佳选择; 因此, 世界上开挖直径不超过 8 m 的水工隧道大多采用双护盾 TBM。开挖较大直径的隧道, 采用双护盾 TBM 的优势就不如单护盾 TBM, 尤其是在软岩地层条件下。这是因为在软岩地层中 TBM 的掘进速度快(开挖时间短), 单护盾 TBM 比双

护盾 TBM 的掘进循环时间短得多, 且由于大直径隧道经常失稳可能导致伸缩接头的有效性降低。为了避免这些问题, 提高双护盾 TBM 在混合岩地层大直径隧道中的掘进效率, 10 a 前引入了双护盾通用 TBM(DSU TBM)。

这种经过改进的 TBM 有如下优势: 1) 设计有新型的伸缩接头, 可避免由于不稳定地层产生的问题, 可在更广泛的条件下采用双护盾模式; 2) 增加了探测、打桩和注浆功能, 可对掌子面的岩石进行预处理; 3) 设计了短锥形护盾, 具有较高的扩挖能力及极高的盾构推力, 使其能够在挤压地层和深埋条件下进行隧道开挖。

但是, 这种双护盾通用 TBM 不具备土压平衡(EPB)或泥水平衡 TBM 稳定掌子面的能力, 因此在软弱地层中无法应用。

### 1.3 单护盾 TBM—敞开模式

在混合岩条件下开挖大直径隧道, 可选用该类 TBM 或双护盾 TBM。采用该类 TBM 可开挖与管片衬砌交替进行; 因此, 单护盾 TBM 的工作效率比双护盾 TBM 低, 且在硬岩中开挖时更加明显。

与双护盾通用 TBM 相比, 单护盾 TBM 在地质适用性方面具有以下特点: 1) 由于无法在气密压力模式下运行, 因此在软弱地层中具有同样的局限性; 2) 由于单护盾均较长, 扩挖装置有限, 对挤压地层更为敏感; 3) 在软弱地层或混合地层条件下可能很难操纵; 4) 结构简单, 因而较易维修和操作。

### 1.4 单护盾 TBM—双模式

这种单护盾 TBM 能够以敞开和土压平衡(EPB)2 种模式运行: 在 EPB 模式下运行时, 开挖仓的淤泥通过螺旋输送机排出; 在敞开模式下运行时, 可根据具体设计采用螺旋输送机或带式输送机。

从螺旋输送机转换到带式输送机需要相当长的时间, 且所有相关操作在刀盘上进行。对于大直径 TBM, 可能同时安装螺旋输送机和带式输送机, 从 EPB 模式转换到敞开模式或反向转换刀盘布置需做很大改变。若采用同时装配螺旋输送机和带式输送机的大直径 TBM, 2 种出渣系统的拼装设计会造成出渣效率的相互影响, 通常会降低 TBM 在 2 种模式下的生产能力。若开挖的隧道段大多为软弱地层或岩石强度和耐磨指数不是很高, 由于螺旋输送机的特殊设计可能会有利于双模式, 单独采用螺旋输送机是最佳选择。

虽然具备双模式运行能力, 但这种 TBM 仍具有地质局限性, 尤其不适用于深埋混合岩地层。其原因如下: 1) 由于大量超挖不符合 EPB 运行要求, 因此对挤压性地层较为敏感; 2) 为了能够在 EPB 模式下工作, 开挖面和 TBM 之间的间隙应保持最小, 而这样会使 TBM 易受挤压地层的影响; 3) EPB 模式在软弱地层

中效率较高,但在破碎岩层中,由于泥浆的稠度导致即使采用最新的添加剂也无法形成适合 EPB 的混合物,因此效率较低;4)在硬岩中,其工作效率比双护盾 TBM 低。

## 2 大直径隧道工程 TBM 选型标准

在混合地质条件下开挖大直径、长隧道,TBM 应具备以下主要特征:1)能够在不同的地质条件下有效掘进;2)能够安装预制衬砌系统;3)能够在挤压地层或不稳定地层中掘进;4)在穿越山岭时能够克服局部特殊地质条件;5)依据不同的地质构造,可能还要求 TBM 能够在压力模式(EPB)下开挖。

综上所述,由于每座隧道都有其各自的特点,各不相同,因此,并不存在对每座隧道都适用的 TBM。

考虑到现有的各种 TBM 的特点,表 2 可作为一般性指南,用于针对具体大直径隧道的 TBM 选型。

表 2 TBM 选型指南

Table 2 Guideline of selection of TBM types

序号	可掘进性	挤压地层	不稳定地层	松散地层	TBM 类型
1	低	否	否	否	双护盾通用(DSU)
2	低	否	否	是	单护盾—双模式(SS - DUAL MODE)
3	低	否	是	否	DSU
4	低	否	是	是	SS - DUAL MODE
5	低	是	是	是	SS - DUAL MODE
6	低	是	是	否	DSU
7	低	是	否	是	SS - DUAL MODE
8	低	是	否	否	DSU
9	高	否	否	否	单护盾(SS)
10	高	否	否	是	SS - DUAL MODE
11	高	否	是	否	SS
12	高	否	是	是	SS - DUAL MODE
13	高	是	是	是	SS - DUAL MODE
14	高	是	是	否	SS
15	高	是	否	是	SS - DUAL MODE
16	高	是	否	否	SS

从表 2 可以看出:1)若地质预报显示没有松散地层,则选用双护盾通用或单护盾 TBM 最合适,再根据岩石的可掘进性从两者中选择(若岩石较硬,则优先选用双护盾通用 TBM,反之,就选单护盾 TBM);2)若存在松散或软弱地层,最好选用双模式 TBM,但在硬岩地段其性能会降低;3)挤压地层对 TBM 选型影响不大,但会影响 TBM 的锥度、扩挖能力和高推力等参数,这间接表明采用双模式 TBM 可能很难满足该要求;4)隧道中若含有不稳定的和块状岩石地段,会影响 TBM 对掌子面前方地层处理能力方面的设计。

## 3 隧道掘进机设计发展

近年来,为了适应在复杂岩石和混合地层条件下开挖大直径、长隧道的需求,业界开始研发更先进的

TBM,意大利 SELI 公司开发了 3 种试点创新项目。

### 3.1 紧凑型双护盾通用 TBM

该类 TBM 设计通常用于在良好围岩条件下进行隧道开挖,无需进行管片衬砌安装;允许安装预制钢拱架制成的 NATM 支护系统,TBM 可以撑在上面进行推进操作。由于这种 TBM 可安装预制钢拱架制成的 NATM 支护系统,因而在不稳定岩石中具备较强的掘进能力,能够替代撑靴式敞开 TBM。

紧凑型双护盾通用 TBM 的设计理念是将整个掘进系统从外部设备到后配套系统以及 TBM 本身结合在一起。这种设计理念的目的是降低 TBM 现场的运输、安装和运行成本,同时提高其工作效率。紧凑型双护盾通用 TBM 示意图如图 1 所示。

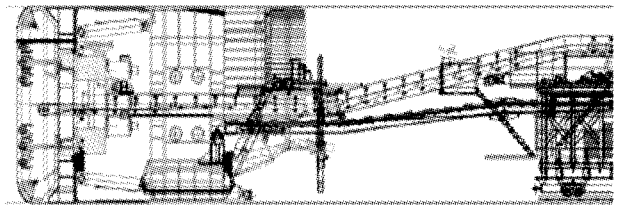


图 1 紧凑型双护盾通用 TBM

Fig. 1 DSU compact TBM

### 3.2 土压平衡双护盾通用 TBM (DSU EPB TBM)

该类 TBM 设计主要用于在含有部分软弱 / 松散地层的硬岩中掘进长隧道。其主要运行特点是:1)既能在双护盾敞开模式下运行,也能在 EPB 模式下运行;2)适用于挤压性地层(短锥形盾构设计、扩挖设备和高盾构推力);3)当穿过断裂破碎带 EPB 模式无效,具有超前处理地层的功能。

印度北阿坎德邦(Pipalkoti)土压平衡双护盾通用 TBM 示意图见图 2。埃塞俄比亚 Beles 引水隧道双护盾通用 TBM 示意图见图 3。

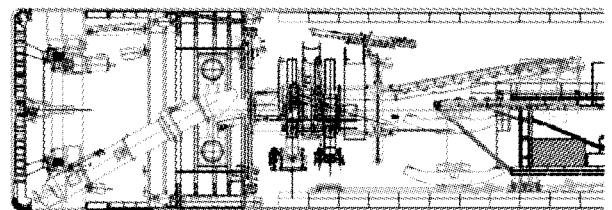


图 2 印度北阿坎德邦(Pipalkoti)土压平衡双护盾通用 TBM

Fig. 2 India Pipalkoti DSU EPB TBM

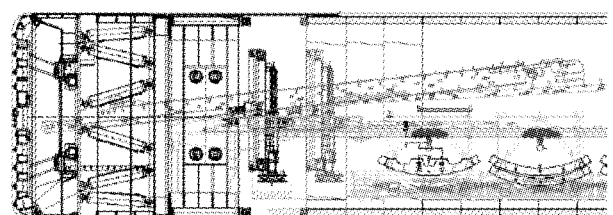


图 3 埃塞俄比亚 Beles 引水隧道双护盾通用 TBM

Fig. 3 Beles headrace DSU TBM



在该类 TBM 的最初设计中,当 TBM 从敞开模式转换到 EPB 模式时,需要大量停机时间来改变其配置;而在第 2 代设计中允许 TBM 在不改变其配置的情况下从敞开模式转换到 EPB 模式,从而节省时间。

### 3.3 土压平衡单护盾通用 TBM(SSU EPB TBM)

该类 TBM 设计用于软岩段和软弱/松散地层段交替情况下的隧道掘进。其主要运行特点有:1)既能在敞开模式下运行,也能在 EPB 模式下运行;2)工作效率高(功率大、推力高、管片拼装速度极快、管片环很长);3)适用于挤压性地层(短锥形盾构设计、扩挖设备和高盾构推力);4)当穿过断裂破碎带 EPB 模式无效时,有处理掌子面前方地层的能力。

该设计允许 TBM 在不改变其配置的情况下从敞开模式转换到 EPB 模式,从而节省时间。土压平衡单护盾通用 TBM 实际上是单护盾双模式 TBM 的升级,在硬岩及不稳定岩层和挤压性地层掘进中具有极高的工作效率和处理能力。对于中硬岩或软岩地层,可在该类 TBM 与土压平衡双护盾通用 TBM 之间选用。

## 4 采用新型 TBM 穿越不良地层

上述新型 TBM,尤其是土压平衡双护盾通用 TBM

(DSU EPB TBM)和单护盾通用 TBM(SSU TBM),可用于开挖不稳定岩层、软弱地层、岩爆和挤压地层地段。

采用 EPB 模式和(或)断层预处理技术,均可穿过断层,具体情况取决于地层性质(稳定性)。

此外,上述设计的新型 TBM 还可较好地处理大量涌水和气体涌入情况。

采用这些新型 TBM 能够克服传统 TBM 由于不良地质情况导致的长时间停机的问题,很大程度地降低在复杂地质条件下 TBM 开挖的风险。

## 5 结论

传统 TBM 没有专门针对复杂地质条件下的大直径隧道的研究与设计。为满足市场需求,必须开发新型 TBM。意大利 SELI 公司开发的 3 种新型 TBM,每种专门针对特定的地质条件,这些新型的 TBM 能够应对复杂的地质条件,并能克服在不同覆盖层下开挖长隧道时的最常见危险。

注:本文英文原文已发表在《第五届中国国际隧道工程研讨会论文集》,该文由《隧道建设》编辑部译。

## 中铁隧道申报的河南省创新型科技团队通过专家评审

由中铁隧道集团盾构及掘进技术国家重点实验室和中铁隧道集团有限公司科技设计部联合申报的“地下工程技术与装备创新团队”于 2011 年 12 月 26 日顺利通过河南省科技厅组织的专家评审。

“地下工程技术与装备创新团队”依托国家重点实验室、国家级企业技术中心和河南省隧道技术与装备院士工作站,团队带头人是中铁隧道集团有限公司总工程师、国家重点实验室主任洪开荣,主要从事结构工程、岩土工程、环境工程、材料、装备及信息技术等五大领域的研究与创新工作。

该创新团队现有成员 24 人。其中:院士 1 人,副高级及以上职称 19 人,中级职称人员 4 人;国家一级注册建造师 11 人,国家注册岩土师 1 人;享受国务院特殊津贴 6 人,中国中铁总公司专家 9 人,中铁隧道集团公司专家及学科带头人 15 人。

该创新团队在盾构设备研制、盾构掘进技术、隧道设备研制、隧道监控量测与信息化施工技术、隧道结构稳定性研究、软弱破碎围岩新奥法施工、注浆及防排水、控制爆破、通风防尘、岩爆及大变形、瓦斯及揭煤、高应力区及大跨度等特殊隧道施工技术及新工艺、新材料和新设备研究等领域,都取得了可喜成果和突破性进展,先后获得国家科技进步奖 8 项,省部级科技进步奖 57 项,国家级工法 8 项,国家发明专利 6 项,国家实用新型专利 26 项,为盾构产业化基地建设、高铁及水下隧道等重点工程项目的顺利履约及“科技兴企”战略的实现打下了坚实的基础。

今后,“地下工程技术与装备创新团队”将以高起点、高水平、高目标的总体思路为指导,依托盾构及掘进技术国家重点实验室这个国家级平台,紧密结合盾构及掘进技术发展的实际需求,致力于盾构及掘进技术等地下工程技术方面具有创新性的应用基础研究,坚持“四位一体”的研发战略构想,走技术创新、设备创新和管理创新之路,努力打造一支特色鲜明、精明强干的创新型团队,成为国内外在该研究领域有重大影响的应用基础研究和高新技术创新集成的高水平研究队伍,为地下工程技术与装备的发展和进步作出更大的贡献。

(本刊记者 2012-01-10)