

文章编号: 1673-3363-(2013)05-0633-09

# TBM 应用于深部煤矿建设的可行性 及关键科学问题

刘泉声<sup>1,2</sup>, 时凯<sup>1</sup>, 黄兴<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要** 分析了我国煤炭资源赋存和生产现状, 指出我国煤矿已经进入深部开采, 并很快进入千米以下开采时代, 深部矿井建设将呈现大型化、集约化和现代化趋势。深部巷道掘进现状和困难表明: 高地应力、高地温等复杂条件下, 传统的钻爆法和综掘机难以满足千米深部大型煤矿快速安全建设的要求。基于深部巷道实际情况和TBM在其他地下工程中所展现的各种优势, 提出将TBM应用于深部煤矿建设, 并回顾了已有的TBM在煤矿中的应用案例。鉴于深部岩体赋存环境及其力学行为的复杂性, 指出了TBM应用于深部煤矿建设的一系列关键问题。

**关键词** 深部煤矿; 岩石巷道; TBM; 复合地层

**中图分类号** TD 263

**文献标志码** A

## Feasibility of application of TBM in construction of deep coal mine and its key scientific problems

LIU Quan-sheng<sup>1,2</sup>, SHI Kai<sup>1</sup>, HUANG Xing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract** The article analyzed the present situation of reserves of coal resources and exploitation, and presented that the coal mine in China had come into the time of deep exploitation and would soon come into 1000-meter-below exploitation time, when the construction of deep coal mine would have the tendency of upsizing, intensification and modernization. The status quo and difficulty of excavation in deep roadway showed that the traditional drilling and blasting method or road header can't meet the requirements of safety and fast-speed in construction of large-scale deep coal mine below 1000 meters under complicated conditions, such as high in-situ stress, high geothermal energy, and so on. Based on the real situation of the deep roadway and various advantages of TBM in other forms of underground engineering, application of TBM in deep coal mine construction is put forward, and construction cases of TBM in coal mine are summarized. Finally, a series of key problems are presented based on the complexities of geological environments and mechanical behavior of deep rock mass.

**Key words** deep coal mine; rock roadway; tunnel boring machine; mixed strata

收稿日期: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41130742); 中国科学院重要方向项目(kzcx2-yw-152)

作者简介: 刘泉声(1962-), 男, 江苏省溧阳市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事岩土工程方面的研究。

E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

Tel: 027-87198856

长期以来,我国煤炭产量和消费量都高居世界首位,国家统计局数据表明,原煤产量呈逐年上升趋势,中电联在“2012 年经济形势与电力发展分析预测会”上预计,2015 年全国煤炭需求量将达到 43 亿 t 左右,比 2010 年增加约 9.7 亿 t,年均增长 5.2%。虽然近年来国家大力发展水电、核电,积极研发风能、太阳能等新能源技术,但在我国能源结构中,煤炭仍然占有极其重要的地位。2003~2010 年间各种能源在能源生产和消费总量中的平均比重中,原煤产量占能源生产总量的 76.4%,煤炭消费量占能源消费总量的 68.9%。

目前除少数矿井外,我国绝大多数矿井主要开采埋深 1 000 m 以浅的煤炭资源,而我国已探明的煤炭资源中,埋深在 1 000 m 以下约有 2.95 万亿 t,占煤炭资源总量的 53%<sup>[1]</sup>。浅部煤炭资源开采殆尽时,深部煤炭资源将是我国最重要的能源保障。然而,随着开采深度逐渐增加而呈现出来的高地应力、围岩大变形、流变、高地温等诸多问题,严重威胁了深部矿井的安全建设和深部煤炭资源的高效开采<sup>[2]</sup>。因此,研究如何安全、高效建设深部矿井具有重要的现实意义和价值。

## 1 我国煤炭资源赋存和开采现状

我国煤炭资源赋存环境复杂多样,地域分布不均衡,西多东少,北富南贫,并且适宜露天开采的资源少。目前我国露天煤矿产量占总产量的 8%左右,而世界上开采条件好的国家,露天开采比重在 50%以上。例如加拿大露天采煤量比重为 88%,德国为 78.3%,印度为 75%,澳大利亚为 73.8%,美国为 61.5%,俄罗斯为 60.9%<sup>[3]</sup>。与这些国家相比,我国煤炭大规模地下开采尤其是进入深部开采后遇到的工程地质条件更加复杂,岩石力学问题更加突出,矿井建设更加困难。

### 1.1 煤炭开采强度

2000 年我国原煤产量为 12.99 亿 t,2005 年为 22.05 亿 t,首次突破 20 亿 t,2010 年为 32.35 亿 t,首次突破 30 亿 t,2011 年更是完成产量 35.2 亿 t。国家能源局《“十二五”煤炭工业发展规划》提出,2015 年我国煤炭产量上限是 37.9 亿 t,按照当前煤炭产量增速,“十二五”末的产量规划将提前完成。根据目前煤炭开采强度,我国煤矿开采深度以每年 8~12 m 的速度增加,东部矿井更是以每 10 年 100~250 m 的深度增加<sup>[4]</sup>,煤炭资源尤其是东部矿区进入深部开采的趋势加快。

### 1.2 煤炭资源开采深度

第 3 次全国煤炭资源预测数据显示<sup>[5]</sup>,河北、山西、安徽、山东、河南、陕西等产煤大省埋深在 1 000 m 以下的预测资源量分别占各省预测总量的 65.5%~92.4%,因此,中、东部浅部煤炭资源开采潜力非常有限。当前中东部新建矿井和部分老矿区主要在 800~1 000 m 开采,同时也已有数十处矿井进入 1 000 m 以下开采,例如济宁唐口煤矿(1 110 m)、新汶矿业集团孙村煤矿(1 400 m)、冀中能源邢东矿(1 300 m)、新汶华丰煤矿(1 230 m)、徐州张小楼煤矿(1 100 m)、义煤集团跃进煤矿(1 080 m)、开滦赵各庄矿(1 160 m)、淮南朱集煤矿(1 020 m)。在煤炭需求和产量居高不下背景下,中东部矿井普遍进入 1 000 m 以下深部开采时代很快到来。

### 1.3 深部矿井建设趋势

深部煤矿建井难度急剧增大,矿井建设周期和成本也会大幅提高,所以深部矿井具有资本投入大、建设周期长、生产成本低、安全压力大的特点。这就使得大型化、集约化、机械化、现代化成为深部矿井建设的必然趋势,同时也与我国煤炭产业结构调整的目标和任务相符合。因此,深部煤矿尤其是超千米深部煤矿建设将以大型煤炭企业、大型煤炭基地和大型现代化煤矿为主,利用优势资本兴建大型或是超大型现代化矿井,通过规模化效应消除开采深度增加导致的成本上升的影响。这样,大资本投入以及对建设周期的要求就使得具有速度优势的大型机械化掘进设备进入矿井建设成为可能。

## 2 深部巷道掘进现状及难点

目前全国每年掘进的 6 000 多 km 的巷道中,深部巷道占了约 28%~30%,随着越来越多的煤矿进入超千米深部开采,这一比例还会不断提高。深部高地应力、高地温和高渗透压的“三高”地质环境导致深部岩体结构特征、力学行为和工程响应与浅部岩体相比有本质区别<sup>[6]</sup>,巷道的开挖、支护更加困难。

### 2.1 高地应力条件下的巷道变形控制

受设计理论、施工方法等因素制约,目前进入深部后仍然采用浅部常用的锚杆、锚索、U 型钢、注浆等支护手段,巷道开挖后短期内即发生大变形甚至严重破坏,如锚杆锚固失效、锚索拉断、混凝土喷层掉块脱落、型钢支架扭曲弯折、底鼓等,如图 1 所示。开滦矿业集团统计<sup>[7]</sup>,井深 1 000 m 时巷道失修率约是 500~600 m 时的 3~15 倍,因此,

当前常用的支护对策、施工工艺、巷道断面形状已经远远不能满足控制围岩变形的要求。

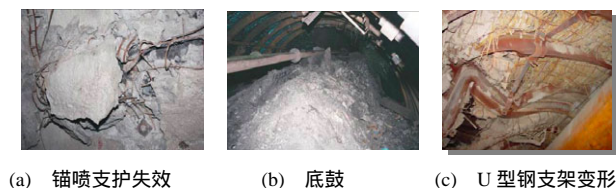


图1 深部巷道大变形

Fig.1 Large deformation of deep roadways

## 2.2 深部巷道掘进方法

深部矿井的大型化趋势下,井田范围更大,巷道距离长,因此必须加快掘进速度才能缩短工期。当前 800~1 000 m 范围内,岩巷主要采用钻爆法或综掘机掘进。钻爆法或综掘机施工时,由于出碴、铺设轨道等工序的干扰,受空间限制,开挖后底板不能及时支护,而后期对底板支护时,底板围岩破坏范围已经变大,这也是造成深部巷道底鼓难以治理的重要原因。

因此,从施工机械化水平、掘进速度、变形控制尤其是底鼓治理的角度来看,钻爆法和综掘机掘进都不能满足深部、尤其是超千米深矿井岩石巷道掘进的要求。

## 2.3 深部高地温热害

据现有测量数据<sup>[8]</sup>,深度每增加 100 m,地温将上升 3~5℃,考虑 15℃ 恒温带时,在 1 000 m 深度处温度将超过 35℃。如:淮南九龙岗矿 830 m 深采煤工作面气温高达 30℃;平顶山六矿地温梯度为 3.2~4.4℃/(100 m),埋深 830 m 丁<sub>6</sub>-22260 工作面气温最高时达 46℃,回风流平均气温 39℃。

《煤矿安全规程》规定<sup>[9]</sup>:“生产矿井采掘工作面空气温度不得超过 26℃,机电设备硐室的空气温度不得超过 30℃;当空气温度超过时,必须缩短超温地点工作人员的工作时间,并给予高温保健待遇。采掘工作面的空气温度超过 30℃、机电设备硐室的空气温度超过 34℃时,必须停止作业。”目前钻爆法或综掘机掘进中,施工人员主要从事繁重的体力劳动,如架设型钢支架、打钻、喷注浆、施工锚杆锚索等,容易产生热疲劳、中暑、热疹、虚脱,严重危害身体健康,降低工作效率。

## 3 TBM 应用于深部煤矿建设的提出

深部矿井的建设要解决施工方法、变形控制和高地温热害等诸多难题,因而必须采用新的施工方法。从我国其他地下工程的施工现状来看,全断面

岩石掘进机(TBM, Tunnel Boring Machine)被广泛应用于铁路隧道、输水隧洞中,具有机械化程度高、施工质量好、掘进速度快、节省劳动力、安全等优点,因此可以成为深部矿井建设的一种选择。由于 TBM 设备昂贵,很容易不被建设方所接受,但工程实践表明,当隧道长度与直径之比大于 600 时,采用 TBM 施工是经济的<sup>[10]</sup>,新建大型煤矿的巷道长达数千米,长径比都能满足这一标准,而且与钻爆法和综掘机相比,TBM 具有更加明显的优势,完全可以应用于深部矿井建设。

## 3.1 施工速度快

TBM 真正实现了掘进、出碴、支护同步进行,各工序间干扰少,因此其最大特点是快速,速度一般是钻爆法的 3~10 倍<sup>[11]</sup>。图 2 为钻爆法和 TBM 施工的典型工序,钻爆法各工序是间断循环进行的,只能在一道工序完成后才能进入下一工序,而 TBM 实现了各工序平行作业、连续交替循环,同时机械化水平也要比钻爆法高,因而施工速度优势明显。因此,TBM 如果能够成功应用于深部矿井建设,有望大幅缩短工期。

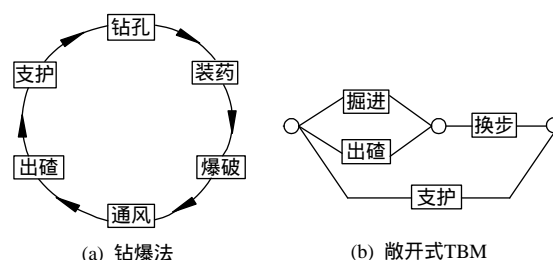


图2 钻爆法和 TBM 的典型施工工序

Fig.2 Typical construction process of D & B and TBM

## 3.2 变形控制优势明显

### 3.2.1 圆形断面优势

对淮南矿区埋深 750~1 000 m 的矿井现场地应力测试结果表明<sup>[12]</sup>,砂岩区段侧压力系数为 1.64~1.70,泥岩区段为 1.08~1.18,随着埋深增大,深部软弱围岩中应力场近似为静水压力场。由于 TBM 采用圆形断面,在近似静水压力状态下,更有利于控制软弱围岩变形。同时,圆形断面和机械开挖方式对围岩形成均匀卸载,有利于消除应力集中现象,减弱了应力重分布对围岩的扰动效应。圆形支护结构能够充分利用混凝土材料的抗压性能,提高支护结构的承载能力。图 3 为深部直墙半圆拱形巷道收敛变形后的景象,可以发现帮脚部位强烈挤出,使巷道断面趋近于圆形,侧面说明采用圆形断面对控制围岩变形是有利的。

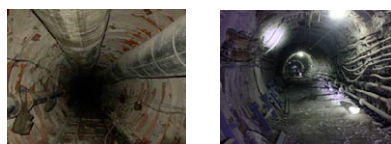


图 3 深部巷道变形趋于圆形化

Fig.3 Circular trend of deformation in deep roadways

### 3.2.2 支护及时

与综掘机相比, TBM 真正实现了掘进、支护同步进行, 及时对围岩支护, 限制松动圈范围扩大, 有利于控制围岩变形。从根本上克服了综掘机掘进速度远大于支护速度, 只能采用支护效果差的型钢支架快速通过的弱点。

### 3.2.3 施工扰动小

深部煤矿软岩具有易受开挖卸荷和施工扰动影响的特点。虽然光面预裂爆破和定向断裂控制爆破技术广泛被采用, 钻爆法开挖的爆炸应力波和高应力瞬态卸荷形成的卸荷应力波对于围岩的破坏更充分, 岩体中裂纹激活、扩展, 在围岩内部形成破裂损伤区, 对围岩产生较大扰动和损伤<sup>[13]</sup>。而 TBM 通过刀盘对岩石的机械切割力破岩, 卸荷速率缓慢, 对围岩的扰动小。Aston 等<sup>[14]</sup>对同一厚砂岩地层中分别采用 TBM 和钻爆法施工的 2 条相距 45 m 的平行隧道围岩进行现场测试后, 发现钻爆法隧道的围岩中裂隙数量远多于 TBM 施工的隧道。如图 4 所示, 钻爆法施工的隧道周围 2 m 内存在多达 7 条裂隙, 而 TBM 施工的隧道仅在 1.5 m 处存在 1 条原生裂隙, 可见钻爆法对围岩的扰动远大于 TBM。并且 Aston 基于测试结果和现场情况, 在忽略岩石风化和地下水作用后, 将围岩破裂损伤区的成因归为 2 方面: 开挖卸荷导致的应力重分布和爆破扰动, 如图 5 所示。钻爆法产生的爆破震动会直接在围岩内产生裂纹区, 而 TBM 隧道围岩中只存在因开挖卸荷而产生的破裂损伤区。并且与钻爆法的瞬时动态卸荷方式不同, TBM 卸荷速率远小于钻爆法, 对围岩扰动小, 可以进一步减小破裂损伤区的范围, 有利于控制围岩变形。

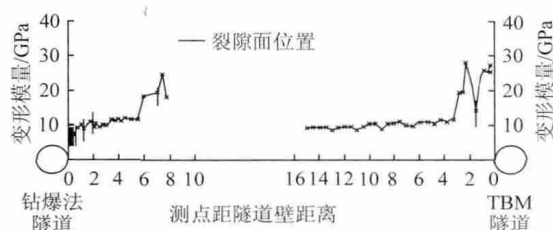


图 4 隧道围岩裂隙实测分布

Fig.4 Cracks surrounding openings by site observation

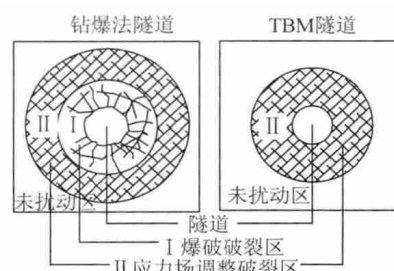


图 5 钻爆法与 TBM 对围岩的扰动

Fig.5 Fracture zones surrounding blasted and bored openings

### 3.2.4 全断面支护控制底鼓

TBM 采用的圆形断面消除了帮脚和底角的应力集中效应, 可以降低底板围岩的破坏程度。更重要的是, 与钻爆法和综掘机相比, TBM 能够真正实现对底板的及时支护, 既防止底板因长期裸露而引起的风化, 又保证了整个断面支护强度一致, 因此底板不再是薄弱环节。可以预见, 采用 TBM 施工后, 只要合理选取支护参数, 有望解决深部煤矿的底鼓治理难题。

### 3.3 施工安全、机械化程度高解决热害难题

TBM 掘进时工人在护盾的保护下工作, 护盾和刀盘将施工人员与围岩隔开, 防止围岩掉块和塌落, 提供了一个安全的空间。TBM 的机械开挖方式避免了因爆破而导致的工伤事故, 同时, 施工中粉尘量少, 改善了作业环境, 保障了工作人员的健康。而且由于机械化程度高, 很多工序避免了工人直接操作, 降低了人身伤害事故率。

对于深井高地温热害问题, 与钻爆法和综掘机相比, TBM 实现了集中控制、远程控制和自动控制, 掘进、支护、出碴等工作由机械完成, 大幅提高了机械化水平, 降低了劳动强度, 减少了施工人员数量, 一般认为 TBM 施工人员比钻爆法少 30%~40%<sup>[15]</sup>。从这方面来讲, 可以减少高地温环境对施工人员健康的危害。

### 3.4 经济性

#### 3.4.1 超挖控制

钻爆法开挖的巷道轮廓往往是不规则的, 存在超挖现象, 一般超挖量可达 10%~20%, 甚至更多, 因此会消耗更多的支护材料。而 TBM 掘进时能准确控制断面形状, 岩壁光滑平整, 一般超挖量可控制在 5% 以内, 而且由于减少了对围岩的扰动, 控制围岩变形所需的衬砌量也相应减少, 因此能够有效控制支护材料消耗量。Fawcett<sup>[16]</sup>对南非某输水工程进行统计后发现, 采用钻爆法施工的隧洞每延米

混凝土用量比 TBM 施工的要多 63%。

### 3.4.2 工期效益

鉴于 TBM 相对于钻爆法和综掘机的速度优势,可以缩短工期,降低贷款利息费用,而且提前投产也会产生效益。以淮南矿区为例,假设矿井生产能力为 6.0 Mt/a,按吨煤收益 160 元计算(2011 年淮南矿业集团吨煤成本在 410 元左右,合同电煤价格 560 元/t(4 800 大卡)或 580 元/t(5 000 大卡),不考虑价格更高的市场电煤),工期缩短一个月则有约 8 000 万元的收益。

### 3.4.3 人工成本

对秦岭特长隧道的施工成本分析后发现<sup>[17]</sup>,在当时的工资水平下,TBM 施工人工费为 1 329 元/m,而钻爆法为 2 326 元/m,是 TBM 的 1.75 倍。

### 3.4.4 减少维修成本

从目前中东部地区埋深 800~1 000 m 的巷道情况来看,不论是采用钻爆法还是综掘机施工,几乎所有巷道建成后很短时间内就要巷修,有的甚至要经过多次巷修才能稳定。采用 TBM 施工时,则可克服上述困难,一次支护到位,尤其是能及时对底板支护,大大降低了巷道支护结构失效的风险。

## 4 TBM 在煤矿中的施工案例

### 4.1 国外工程

1971 年德国最先将 TBM 应用于煤矿建设,此后不久美国也有煤矿采用 TBM 掘进巷道<sup>[18]</sup>,但都没有 TBM 施工状况的文献报道。1983 年,加拿大的 Donkin-Morien 煤矿分别采用 TBM 和钻爆法施工 2 条平行的斜井<sup>[19]</sup>,岩性以砂岩为主,单轴抗压强度为 30~100 MPa(平均约 50 MPa)。TBM 由 Lovat 公司生产,刀盘直径 7.6 m,刀盘上装有能切割硬岩的盘形滚刀和适合于软岩的撕裂刀。斜井前 1 500 m 的掘进情况可见图 6。

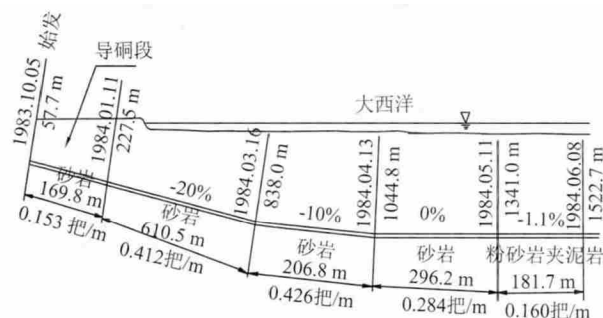


图 6 TBM 掘进和刀具消耗情况

Fig.6 Tunnel driving progress and cutter use

图 6 显示,从 227.5 m 处 TBM 真正开始全断

面掘进算起,至 1 522.7 m 处截止,共掘进 1 295.2 m,历时 5 个月,平均月进尺近 300 m。坡度-20%段(从 227.5 m 到 838.0 m)历时 65 d,平均月进尺约 305 m,坡度-10%段(从 838.0 m 到 1 044.8 m)平均月进尺 221.6 m,水平砂岩段平均月进尺 317.4 m,水平砂质泥岩段平均月进尺为 194.7 m。与另一条钻爆法施工的斜井对比后发现:TBM 施工速度是钻爆法的 4 倍,而每延米消耗人工约是钻爆法的 1/3,并且由于井壁光滑均匀,通风成本也有所降低。

### 4.2 国内工程

大同塔山矿<sup>[20]</sup>井田面积 170.91 km<sup>2</sup>,设计生产能力 1 500 万 t/a,主平硐采用罗宾斯公司双护盾 TBM 施工,刀盘直径 4.82 m,主要岩性为石灰岩、花岗岩,中间穿越煤层。2003 年 8 月开始掘进,总掘进长度为 2 960 m,历时 191 d,平均日进尺 16 m,最高日进尺 45.96 m,平均月进尺 493.3 m,最高月进尺 662.5 m,工期比原计划缩短 15 个月,提前 1 a 投产,获得经济效益 87 000 万元<sup>[21]</sup>。

神华新街台格庙矿区规划总面积为 734.5 km<sup>2</sup>,煤炭资源量 13 884.46 Mt,拟采用 TBM 施工长距离斜井,目前已完成项目招标。2 个斜井长均为 6 506 m 左右,采用 6°下坡,斜井内径 6.5 m,落底垂深在 700 m 左右,这将是我国煤矿领域首次运用 TBM 施工下坡、长距离、大埋深的斜井。

塔山矿采用平硐开拓方式,实际上与交通隧道、水工隧洞类似,而神华新街台格庙矿区斜井更符合深部煤矿矿井建设的特点。目前深部煤矿大都采用竖井提升的方式,由于穿越地层的复杂性,需特殊凿井方法,而进入超千米深部煤矿建设时,竖井建设难度还会继续增大。并且由于竖井提升能力有限,开采后会制约矿井的生产能力。因此,神华新街台格庙矿区采用 TBM 施工斜井可以为深部矿井建设起到积极的示范作用,促进煤矿深井建设模式的改变。

## 5 TBM 应用于深部煤矿建设的关键问题

### 5.1 TBM 应用于煤矿建设的地质适用条件

由于技术的发展,TBM 已经可以在较为复杂的地质条件下施工,但与钻爆法相比,施工的灵活性不高,对地质条件的适应性较差。众多工程实例表明,地质条件是决定 TBM 施工能否成功的一大关键因素。例如,广西天生桥二级水电站引水隧洞采用开敞式 TBM 施工,但因隧洞沿线溶洞十分发育,严重影响施工速度,10 a 内累计掘进仅 7.5 km;昆



明掌鸠河引水隧洞采用双护盾 TBM 掘进, 由于隧洞沿线密布小断层, TBM 卡机问题非常严重, 掘进困难, 后改用钻爆法施工; 台湾北宜高速公路雪山隧道也因遇到雪山山脉断层与高压涌水, 多次发生隧道坍塌及突涌水灾害, 后改用钻爆法, 比原计划推迟 8 a 竣工; 锦屏二级引水隧洞工程由于强烈岩爆将 TBM 损毁, 不得不改用钻爆法施工。因此, 要想将 TBM 真正应用于煤矿建设, 必须首先研究 TBM 应用于煤矿建设的地质适用条件。

TBM 应用于煤矿建设的地质适应性研究包含 2 层含义: 1) 针对煤矿地层的实际情况, 研究什么样的煤矿地质条件可以选择 TBM, 即解决采用 TBM 施工的可行性问题; 2) 如果某种特定的煤矿地质条件适合 TBM 施工, 那么采用什么型式的 TBM(开敞式或双护盾式)才能最大限度地发挥其优点。

## 5.2 深部地层地质条件与岩体力学行为对 TBM 施工的控制作用

深部围岩赋存条件及其初始力学行为对 TBM 施工起主要控制作用。交通隧道、水工隧洞选线时都会考虑不良地质体的影响, 尽量避开地质异常带, 而煤矿中各种巷道的布置都是围绕煤炭资源的赋存位置来进行的, 线路选择余地较少。深部煤系地层经受多次构造运动, 地质条件复杂多变, 所布置的巷道不可避免地会穿越地质异常带。大量 TBM 工程事故说明构造破碎带、软弱围岩、高地应力和地下水都会对 TBM 施工产生不利影响, 例如突水、塌方、涌泥、岩爆、卡机等事故, 威胁设备和人员的安全<sup>[22]</sup>。因此, 需要研究深部地层的区域地质、岩体结构、地应力场特征及围岩初始力学行为, 为 TBM 施工适应性、围岩稳定性控制等提供宏观岩体结构模型、初始地应力场分布特征模型及围岩体力学行为演化的初始条件。

因此, 煤矿深部岩体结构精细探测技术和地应力测试技术, 以及根据各自有限测试数据反演分析巷道区域、甚至整个矿区岩体结构面分布规律和原岩应力场的方法, 成为亟需解决的难题。然后在此研究成果的基础上, 分析深部岩体的力学行为对 TBM 施工产生的影响, 最终从 TBM 规划、设计和制造入手, 提高 TBM 对不良地质条件的适应性。

## 5.3 深部复合地层 TBM 破岩机理及适应性

在隧道工程开挖断面范围或开挖延伸方向上, 由 2 种或 2 种以上不同地层组成, 且这些地层的岩土力学、工程地质和水文地质等特征相差悬殊, 这

种地层组合可称为复合地层<sup>[23]</sup>。煤矿岩巷赋存于沉积岩地层, 以泥岩、砂质泥岩、粉砂岩及砂岩等为主, 有时会穿越煤层。泥岩、砂质泥岩都是典型的软岩, 与砂岩的硬度、强度、脆性相差较大, 因此深部煤矿地层为典型的复合地层。

目前复合地层的研究集中在城市地铁盾构施工中, 且复合型式多为上层软土下层岩石的“上软下硬”型, 如广州、深圳、南京等城市地铁施工中常常遇到此类型的复合地层。与地铁隧道“软土-岩石”型的复合型式不同, 煤矿复合地层将是以“软岩-硬岩”型为主。传统的 TBM 主要适用于硬岩和中硬岩地层, 相邻滚刀间岩石的片裂破坏是硬岩和中硬岩地层中 TBM 刀盘的破岩机制, 这也是 TBM 实现连续高效破岩的关键。而由于软岩硬岩的强度、硬度和脆性相差较大, 软岩在滚刀作用下裂纹的产生和扩展机制有很大不同, 对 TBM 破岩效率和刀具寿命产生极大影响。并且复合地层中由于岩石矿物成分、结构、强度、硬度等特性存在较大差异, 容易引发 TBM 破岩系统的一系列问题: 1) 当滚刀从软岩进入硬岩时, 瞬间增大的破岩力会对刀体产生冲击作用, 刀体在冲击荷载反复作用下会产生裂纹, 导致刀圈断裂, 降低滚刀寿命, 如图 7a 所示; 2) 砂岩磨损性大于泥岩, 会导致不同部位刀具磨损程度不同, 使得部分滚刀受力过大; 3) 滚刀在软岩中的转动扭矩小于其启动扭矩时, 将因不能正常转动而产生非正常偏磨, 导致刀体损坏, 如图 7b 所示; 4) 当掘进面软硬不均时, 刀盘会产生受力不均现象, 严重时会引起刀盘开裂或变形, 损坏主轴承, 引发安全问题, 而且也会导致 TBM 姿态难以控制。



(a) 滚刀刀圈断裂 (b) 滚刀偏磨

图 7 复合地层中滚刀非正常破坏

Fig.7 Abnormal damage of rolling cutter in complex strata

由于当前 TBM 刀盘设计理论和方法对煤矿深部复合地层并无针对性, 为解决 TBM 在深部复合地层中掘进效率和安全性问题, 必须开展 TBM 刀具破岩机理研究, 尤其是重点研究复合地层软硬界面和软弱岩层的破岩机制, 提出适用于煤矿软岩和复合地层的滚刀破岩力计算模型, 分析各种工况下刀盘受力变化规律, 为深部复合地层 TBM 刀盘设

计提供理论依据和相关参数,以保证 TBM 在深部煤矿软岩、硬岩及软硬岩复合断面中的破岩效率。

#### 5.4 深部复合地层大变形机理及卡机灾害防治

深部岩体高地应力与低强度的矛盾异常突出,根据现有地应力测试资料,当埋深在 1 000 m 时最大主应力可达 30 MPa 以上,深部复合地层围岩极易产生强烈挤压性大变形,导致 TBM 发生卡机事故并停机,威胁设备和人员安全。卡机事故往往发生在地应力高、围岩破碎的区域<sup>[24-26]</sup>,据统计软岩大变形是造成 TBM 停机的重要因素之一,如图 8 所示。而深部煤矿巷道掘进时常遇到泥岩、砂质泥岩等软弱围岩,即使围岩完整性较好,在高地应力作用下短时间内也可能发生较大变形,因此也存在发生卡机事故的风险。

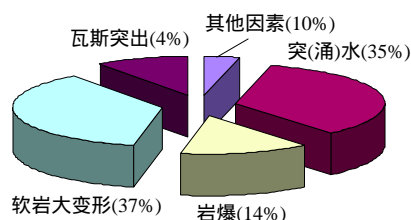


图 8 TBM 施工中主要工程地质问题类型所占比例<sup>[22]</sup>

Fig.8 Proportion of main engineering geological problems in TBM tunneling

当围岩变形达到预留间隙导致围岩与 TBM 发生接触,进而作用在 TBM 上的挤压力持续增大从而使 TBM 无法前进而停机时,即引发卡机事故。可见,围岩与 TBM 的相互作用是卡机机理研究的核心内容。与钻爆法不同,TBM 开挖卸荷速率缓慢,开挖边界上的应力处于缓慢的准静态卸荷过程,因此围岩中具有较高的残余应力和应力集中,对于未支护的护盾区域来讲,围岩呈现渐进破坏特征,具有显著的时效性。而护盾区域围岩的应力和变形又受掌子面和衬砌结构的纵向虚拟支撑作用和横向承载拱效应影响,具有空间性,如图 9 所示。因此,研究卡机机理时要综合考虑围岩力学行为的时间和空间效应。

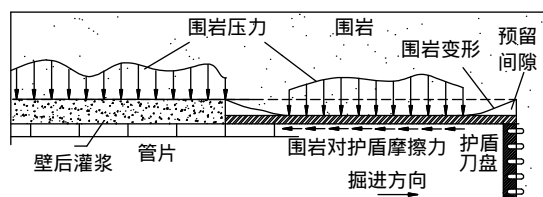


图 9 围岩变形的空间效应示意图

Fig.9 Sketch of spatial effects of surrounding rock deformation

综合来看,现有研究难以反映 TBM 开挖卸荷下围岩的变形规律和卡机灾害的孕育发生机理,并且多针对的是均匀软弱岩层,而也较少考虑时空效应,因此,亟需研究深部高地应力复合地层 TBM 开挖卸荷条件下围岩的大变形机理及其时空演化规律,确定围岩变形与停机时间、掘进速率和支护时机的关系,提出卡机灾害发生的临界条件,给出合理的预留变形量,为 TBM 卡机灾害的预测和防治提供依据。

#### 5.5 深部复合地层 TBM 施工围岩支护作用机理及稳定控制

与钻爆法和综掘机施工不同,TBM 对围岩扰动小,且支护及时,能有效控制变形,但围岩在较高残余应力作用下呈现渐进破坏特征,同时高地应力环境中围岩的蠕变效应使得变形长期发展,因此,围岩与支护结构的相互作用比较复杂。此外,如果岩石中膨胀性矿物含量较高,在地下水和风化作用下,围岩具有膨胀、收缩、崩解和软化等不良特性,可导致围岩变形加剧和支护结构失效,例如,强膨胀性围岩的饱和极限膨胀压力可达数兆帕,导致支护结构承担的荷载增加。而且,由于井田范围内巷道布置多且比较密集,巷道掘进时会既对巷道围岩产生扰动影响,同样也对巷道的稳定性产生不利影响<sup>[27]</sup>。

TBM 施工的主要支护型式为“锚喷支护+二次衬砌”(敞开式 TBM)或“管片衬砌+豆砾石”(护盾式 TBM)。考虑深部高地应力围岩缓慢卸荷过程、蠕变特性、膨胀特性和巷道群扰动效应,现有的 TBM 围岩支护理论和稳定控制方法并不能照搬到深部煤矿巷道中,因此,需要研究深部煤矿复合地层中 TBM 掘进的围岩支护作用原理和变形控制理论,并提出相应的支护技术。

#### 5.6 深部复合地层 TBM 施工围岩分级研究

围岩分类分级是对地层可掘性和 TBM 施工适应性起指导作用的指标体系,可以为 TBM 刀盘、护盾、驱动系统及支护体系设计提供依据,指导 TBM 施工。而现有煤矿围岩的分级方法都是基于巷道稳定性提出的,难以真正指导 TBM 施工<sup>[28]</sup>。因此,应当重点研究并建立基于深部复合地层 TBM 可掘性的围岩分级方法和体系。

岩体可掘性的研究主要考虑地层复合特性、岩体力学性质、结构面特征、矿物成分、地应力场等因素与 TBM 掘进速度、刀具磨损、经济性评价的

相关关系,确定岩体可掘进性的表征参数和量化指标。围岩分级体系的研究则要基于岩体可掘进性评价体系,通过定性和定量分析方法,确定围岩相应的分级、分类指标,最终建立指标的定级和量化方法,为 TBM 施工提供依据和指导。

### 5.7 煤矿建设与生产安全的相关研究

煤系地层常含有瓦斯,严重威胁施工和人员安全,TBM 应用于煤矿时要考虑设备在防爆、煤安认证等安全准入与使用方面问题,确保设备安全、合法合规,同时也要开展 TBM 施工期长距离通风的适宜途径和安全保障措施方面的研究。此外,TBM 施工时可能会穿越煤层,要专门针对揭煤段(尤其是突出性煤层)研究相应的掘进方案和支护措施。

## 6 总 结

煤炭资源开采深度的逐渐加大将使得深部煤矿建设向大型化、集约化和现代化趋势发展,受高地应力、高地温及深部围岩复杂力学行为的影响,矿井建设的难度急剧增大,目前普遍采用的钻爆法和综掘机已经难以满足建井工期、施工安全、成本控制以及巷道变形控制的要求。因此,具多方面综合优势的 TBM 将成为实现矿井快速、安全和高效建设的一种选择。

由于煤矿深部岩体赋存环境的复杂性和地层的复合特性,要想将 TBM 应用于深部矿井建设,需要进行一系列关键岩石力学问题的研究,例如 TBM 应用于煤矿建设的地质适用条件,深部地层地质条件与岩体力学行为对 TBM 施工的影响,深部复合地层 TBM 刀盘的破岩机理,巷道围岩大变形机理,TBM 卡机灾害孕育、发生机理及防治措施,基于岩体可掘性的 TBM 施工围岩分级体系等等。从目前 TBM 在其他地下工程中的应用情况来看,我国已经基本实现了在不同地域、不同地质条件下的 TBM 施工。在这个过程中逐步积累了相应的 TBM 制造、施工和管理经验,同时也培养了一批与 TBM 相关的设计、制造、科研、施工及管理队伍。这为 TBM 在深部煤矿建设中的应用创造了良好的条件,也使其大规模推广成为可能。

### 参考文献:

- [1] 彭苏萍.深部煤炭资源赋存规律与开发地质评价研究现状及今后发展趋势[J].煤,2008,17(2):1-11.  
PENG Su-ping. Present study and development of the deepen coal resource distribution and mining geologic

- evaluation[J]. Coal, 2008, 17(2): 1-11.
- [2] 何满潮.深部的概念体系及工程评价指标[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2854-2858.  
HE Man-chao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2854-2858.
- [3] 姬长生.我国露天煤矿开采工艺发展状况综述[J].采矿与安全工程学报,2008,25(3):297-300.  
JI Chang-sheng. On development of surface coal mining systems in China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 297-300.
- [4] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.  
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study of rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [5] 毛节华,许惠龙.中国煤炭资源分布现状和远景预测[J].煤田地质与勘探,1999,27(3):1-4.  
MAO Jie-hua, XU Hui-long. China's coal resource distribution and perspective prediction[J]. Coal Geology and Exploration, 1999, 27(3): 1-4.
- [6] 卢兴利,刘泉声,张伟,等.高应力软岩非线性体积增加试验研究[J].煤炭学报,2009,34(7):903-906.  
LU Xing-li, LIU Quan-sheng, ZHANG Wei, et al. Test study of inelastic volume increase of soft rock in high stress[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 903-906.
- [7] 谢和平.21世纪高新技术与我国矿业的发展与展望[J].中国矿业,2002,11(1):15-22.  
XIE He-ping. Promoting influences of high-tech progress on development of mining industry in the 21st century[J]. China Mining Magazine, 2002, 11(1): 15-22.
- [8] 何国家,阮国强,杨壮.赵楼煤矿高温热害防治研究与实践[J].煤炭学报,2011,36(1):101-104.  
HE Guo-jia, RUAN Guo-qiang, YANG Zhuang. Research and application on preventive measures against heat disaster in Zhaolou Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 101-104.
- [9] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2010:392.
- [10] 张镜剑.TBM的应用及其有关问题和展望[J].岩石力学与工程学报,1999,18(3):363-367.  
ZHANG Jing-jian. Application and some problems of TBM and its prospects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 363-367.
- [11] 张镜剑,傅冰骏.隧道掘进机在我国应用的进展[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):226-238.  
ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Advances in tunnel boring machine application in China[J]. Chinese Journal



- of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 226-238.
- [12] 罗超文,李海波,刘亚群.煤矿深部岩体地应力特征及开挖扰动后围岩塑性区变化规律[J].岩石力学与工程学报,2011,30(8):1613-1618.  
LUO Chao-wen,LI Hai-bo,LIU Ya-qun.Characteristics of in-situ stress and variation law of plastic zone of surrounding rocks around deep tunnels in a coal mine[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(8):1613-1618.
- [13] 左宇军,唐春安,朱万成,等.深部岩巷在动力扰动下的破坏机理分析[J].煤炭学报,2006,31(6):742-746.  
ZUO Yu-jun,TANG Chun-an,ZHU Wan-cheng,et al.Mechanism analysis on failure of deep rock laneway under dynamic disturbance[J].Journal of China Coal Society,2006,31(6):742-746.
- [14] ASTON T R C,GILBY J L,YUEN C M K.A comparison of rock mass disturbance in TBM and drill and blast drivages at the Donkin Mine,Nova Scotia[J].Geotechnical and Geological Engineering,1988,6(2):147-162.
- [15] 周小松.TBM 法与钻爆法技术经济对比分析[D].西安:西安理工大学岩土工程研究所,2010.
- [16] FAWCETT.Three water tunnels in Natal,South Africa [C]//FAWCETT D F.Proc ISRM Symposium on Design and Performance of Underground Excavations.London:British Geotechnical Society,1984:247-254.
- [17] 刘孟山,刘得用.秦岭特长隧道 TBM 施工工程经济分析简介[J].科技交流,2000,30(4):16-23.  
LIU Meng-shan,LIU De-yong.Brief introduction of construction engineering economic analysis of Qinling extra long tunnel[J].Scientific and Technological Exchange,2000,30(4):16-23.
- [18] HANDEWITH H J.TBM tunnels in the western hemisphere-an overview[J].Tunnelling Technology Newsletter,1983,41:1-8.
- [19] PALMER J,LOVAT R P,MARSH J C.Performance of a 7.6 m diameter full-face tunnel-boring machine designed for a Canadian coal mine[C]//Tunnelling '85-the Fourth International Symposium.Brighton:[s.n.],1985:3-8.
- [20] 宫全红.TBM 岩巷掘进机在平峒施工中的运用[J].煤炭工程,2004(6):27-28.  
GONG Quan-hong.Application of TBM in flat cavern construction[J].Coal Engineering,2004(6):27-28.
- [21] 高润平,刘文.隧道掘进机在塔山煤矿平硐施工中的应用[J].煤矿开采,2005,10(5):44-46.  
GAO Run-ping,LIU Wen.Application of the tunneling machine in the construction of chamber in Tashan coal mine[J].Coal Mining Technology,2005,10(5):44-46.
- [22] 尚彦军,杨志法,曾庆利,等.TBM 施工遇险工程地质问题分析和失误的反思[J].岩石力学与工程学报,2007,26(12):2404-2411.  
SHANG Yan-jun,YANG Zhi-fa,ZENG Qing-li,et al.Retrospective analysis of TBM accidents from its poor flexibility to complicated geological conditions[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(12):2404-2411.
- [23] 吴起星.复合地层中盾构机滚刀破岩力学分析[D].广州:暨南大学理工学院,2011.
- [24] 尚彦军,王思敬,薛继洪,等.万家寨引黄工程泥灰岩段隧洞岩石掘进机(TBM)卡机事故工程地质分析和事故处理[J].工程地质学报,2002,10(3):293-298.  
SHANG Yan-jun,WANG Si-jing,XUE Ji-hong,et al.A case study on TBM block in marls at connection works No.7 Tunnel of yellow river diversion project[J].Journal of Engineering Geology,2002,10(3):293-298.
- [25] 尹俊涛,尚彦军,傅冰骏,等.TBM 掘进技术发展及有关工程地质问题分析和对策[J].工程地质学报,2005,13(3):389-397.  
YIN Jun-tao,SHANG Yan-jun,FU Bing-jun,et al.Development of TBM excavation technology and analyses and counter measures of related engineering geological problems[J].Journal of Engineering Geology,2005,13(3):389-397.
- [26] 尚彦军,史永跃,曾庆利,等.昆明上公山隧道复杂地质条件下 TBM 卡机及护盾变形问题分析和对策[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3858-3863.  
SHANG Yan-jun,SHI Yong-yue,ZENG Qing-li,et al.TBM Jamming and deformation in complication geological conditions and engineering measures[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(21):3858-3863.
- [27] 刘泉声,时凯,黄兴.临近巷道掘进扰动效应下巷道变形监测分析[J].煤炭学报,2011,36(6):897-902.  
LIU Quan-sheng,SHI Kai,HUANG Xing.Analysis on site monitoring of roadway under disturbed effects by excavation of neighboring roadways[J].Journal of China Coal Society,2011,36(6):897-902.
- [28] 何发亮,谷明成,王石春.TBM 施工隧道围岩分级方法研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(9):1350-1354.  
HE Fa-liang,GU Ming-cheng,WANG Shi-chun.Study on surrounding rockmass classification of tunnel cut by TBM[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(9):1350-1354.