

# 北京铁路地下直径线泥水盾构刀盘、刀具适应性分析

何峰, 李小岗, 孙善辉

(中铁隧道集团北京地下直径线项目部, 北京 100045)

[摘要] 结合北京站至北京西站地下直径线工程实例, 通过不同盾构刀盘刀具配置在砂卵石下的应用对比, 重点对工程刀盘刀具改造前后对地层的适应性进行了详细的对比分析, 提出了砂卵石条件下刀盘刀具配置应注意的关键问题, 对类似工程有借鉴作用。

[关键词] 直径线; 泥水盾构; 刀盘刀具; 适应性

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)12-0035-06

## 1 前言

盾构法作为地下工程修建的一种施工方法, 其成败关键系之于设备本身。而盾构刀盘刀具的配置是其中非常重要的一环, 其配置能否适应工程的地质条件, 直接影响到盾构机的切削效果、掘进速度和施工效率, 因此刀盘刀具的配置方案应根据地质条件差异进行对应性的设计<sup>[1]</sup>。

北京站至北京西站地下直径线工程盾构隧道采用 12.04 m 的泥水盾构, 独头掘进距离长 5 175 m。

## 2 工程地质特点

北京地下直径线工程的实际地质情况与初步设计的地勘有较大的出入, 主要表现在: 一是盾构隧道实际穿越地层的密实程度为很密(即  $N_{120} > 14$ ); 二是实际施工过程中发现在地下水位变化区域存在 1~2 m 厚的一层卵石胶结层, 经取样试验最大强度达 23 MPa; 三是根据泥水分离渣体筛分试验, 实际隧道穿越地层的成分变化较大, 尤其是局部粘土层的含量、细颗粒的含量与地勘报告出入较大; 四是揭露的卵石粒径比地勘报告所描述要大<sup>[2]</sup>。详细的颗粒筛分及揭露卵石、胶结层见图 1 和表 1。

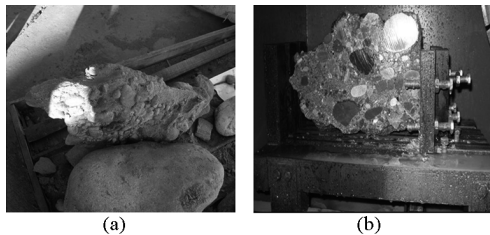


图 1 直径线揭露的胶结层、大卵石  
Fig. 1 The cement floor and large pebble exposed by diameter line

## 3 初装刀盘设计及应用情况

### 3.1 刀盘配置

初装刀盘刀具设计基于最初地质勘测数据, 以常规砂卵石地层掘削为理论基础。刀具配置采用双层切削; 重型撕裂刀为先行刀, 担负主要的切削任务, 切刀主要完成后续土体的刮削, 重型撕裂刀与切刀的刀高差为 20 mm。

采用复合式刀盘, 开口率 30%, 开口部位设计成楔形梯级结构以便刀盘后面的开口逐渐变大, 利于碴土的流动, 防止粘土堵住开口。同时刀盘中心

[收稿日期] 2010-08-10

[作者简介] 何峰(1963—), 男, 浙江诸暨市人, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程方面的施工及研究工作;

E-mail: 523320625@qq.com

开口率设计为 45 % ,有效防止粘土地层泥饼的形成。在刀盘背面安装搅拌臂,防止碴土沉淀,优化

泥水压力的控制和改善泥浆的均匀性<sup>[3]</sup>。

表 1 碴土筛分试验与地勘资料颗粒含量对比表

Table 1 Comparison between screening test and particle concentration data of geological survey

序号	里程	颗粒组成 / %		备注
		筛分试验	地勘资料	
1	DK5 + 355.9	粒径 20 ~ 60 mm 颗粒含量 67 % ,粒径 2 ~ 20 mm 颗粒含量 6 % ,小于 2 mm 颗粒含量 27 %	最大粒径 125 mm ,一般粒径 25 ~ 40 mm ,砾石含量约 65 %	泥水分离后 碴土取样
2	DK5 + 311.2	粒径 20 ~ 60 mm 颗粒含量 51 % ,粒径 2 ~ 20 mm 颗粒含量 21 % ,小于 2 mm 颗粒含量 28 %	最大粒径 120 mm ,一般粒径 20 ~ 45 mm ,砾石含量约 65 %	泥水分离后 碴土取样
3	DK5 + 265.0	粒径 20 ~ 60 mm 颗粒含量 17 % ,粒径 2 ~ 20 mm 颗粒含量 51 % ,小于 2 mm 颗粒含量 32 %	最大粒径 100 mm ,一般粒径 20 ~ 40 mm ,砾石含量约 65 %	泥水分离后 碴土取样
4	DK5 + 026.48	粒径 20 ~ 60 mm 颗粒含量 16 % ,粒径 2 ~ 20 mm 颗粒含量 27 % ,小于 2 mm 颗粒含量 48 %	最大粒径 120 mm ,一般粒径 40 ~ 65 mm ,大于 20 mm 的颗粒含量约 65 %	第 6 个加固点 分层取原状土

初装刀盘刀具配置主要为齿刀:重型撕裂刀(与 17"(1" = 2.54 cm)滚刀具有互换性)、切刀、周边刮刀、中心鱼尾切刀及扩孔刀,如图 2 所示。

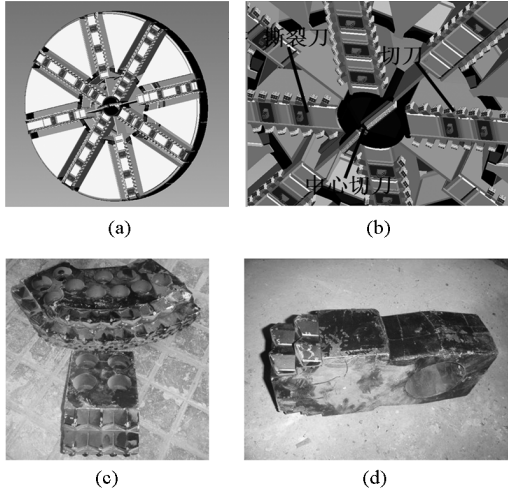


图 2 初装刀盘刀具配置图

Fig. 2 Installation configuration of tool and cutter

### 3.2 初装刀盘刀具应用情况

盾构始发,掘进 69 m 至 DK6 + 718.2 后,出现刀盘扭矩过大,主驱动保险轴断裂。经带压进仓检查,发现刀盘刀具磨损非常严重。

### 3.3 初装刀盘刀具问题原因分析

一是由于目前通过钻探勘察地质存在一定的缺陷,由于钻进过程中已破坏原状土样,因此不能详细揭露地层中的细颗粒含量,以及难以发现存在的钙质胶结层;二是岩土规范中关于砂卵石地层的密实程度主要通过标贯试验确定,但由于盾构刀具的破岩机理要同时考虑刀具的轴向和径向对地层的施加应力,因此现有的密实程度表示很难满足盾

构刀具设计的需求。由于以上问题的存在造成盾构刀具配置与实际地层特点不匹配,以致大卵石含量远超过地勘报告并且出现局部的胶结层后,重型撕裂刀无法松动土层,损坏严重,使切刀被迫参与土体切削,切刀刀齿受卵石碰撞导致大范围崩落,进而发生刀盘、刀具磨损;周边刮刀因线速度最大,磨损也最严重,刀齿过度损坏后,地层直接磨损刀座,刀具由刀齿点接触改变为面接触,最终导致刀盘、刀具磨损严重,具体情况如图 3 所示。



图 3 刮刀、切刀、重型撕裂刀磨损状况图

Fig. 3 Wear status of scraper, cutter and severe tear tool

## 4 刀盘刀具改造

针对初装刀盘刀具配置所出现的问题,根据对地层的认识,考虑对初装刀盘刀具进行改造(直径线盾构刀盘刀具配置的相关说明参见本专辑文章《北京铁路地下直径线盾构选型及设计要点》)。根据不同刀具对地层的适应情况(见表 2),将原设计刀盘改造如图 4 所示。

### 4.1 刀具改造主要内容

1) 将原设计的重型撕裂刀、切刀和周边刮刀分别更换为滚刀、新型耐磨切刀及新型耐磨刮刀。

表2 刀具适应性对照表

Table 2 Comparison of tool adaptability

序号	刀具类型	适应地层或工况	直径线刀具配备
1	滚刀	硬岩地层,一般作为先行刀设计,有滚刀齿型和盘型两种	原刀盘未配备,改造后配备滚刀42把
2	重型撕裂刀	较松散的砂卵石地层,一般作为先行刀设计	原刀盘配备32把,改造后全部更换为滚刀
3	切刀(齿刀、刮刀)	软土:一般适用于粒径小于400mm的砂、卵石、粘土等松散体地层	原刀盘配备切刀296把、刮刀16把;改造后切刀360把、刮刀32把
4	贝型刀	较松散的大粒径砂卵石地层	原刀盘未配置,改造后配备52把贝型刀(撕裂刀),其中26把可更换
5	鱼尾刀、锥形刀、羊角刀	软岩刀具。一般作为中心刀使用。最先切入土体,掌子面破出中心槽,以增加开挖仓土体的流动性	原刀盘配备有12把中心鱼尾状切刀,改造后更换为5把中心双联滚刀
6	周边保护刀	保护刀盘周边,适用于砂砾石地层	24把
7	耐磨合金刀	保护刀盘圆弧面过渡区,适用于砂砾石地层	原刀盘未配备,改造后配备96把
8	仿形刀或超挖刀	适用于有较大曲线的隧道开挖	配备1把仿形刀

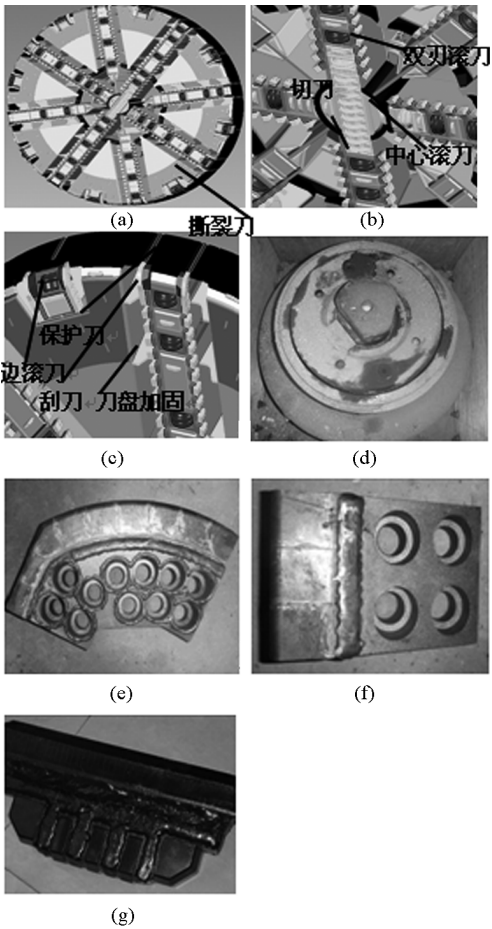


图4 刀盘刀具配置图

Fig. 4 Cutter tool configuration

2)将原设计的刀盘12把中心鱼尾状切刀刀座进行割除,改造为5把中心双联滚刀,同时对刀盘旋转接头进行改造以适应中心鱼尾切刀更换为滚刀,主要是更改仿形刀和检测刀液压管路并进行保护。

3)在刀盘90°和270°辐条上各新增1把17"滚刀。

4)在刀盘辐条新增26把可更换撕裂刀,辐板上新增26把焊接撕裂刀。

5)在刀盘周边辐板上开孔,制作短刀梁,安装边滚刀,刀梁两侧新增1把刮刀和3把切刀,同时在短刀梁两侧附近刀盘倒角处各新增1把焊接撕裂刀,共计8把边滚刀,16把刮刀,48把切刀。

6)在刀盘辐条外径处各新增1把切刀,共计16把切刀。

7)在刀盘外周及外经过渡区新增96把周边保护刀。

#### 4.2 刀盘整体钢结构加固

改造后的刀盘所产生的最大应力是525 MPa,远远高于改造前刀盘的设计屈服应力355 MPa,为此增加加强筋板对刀盘进行加固,确保加固后的刀盘结构满足刀盘整体的强度要求。

在刀盘幅板和辐条之间增加加强钢板,在刀盘辐条和法兰之间增加加强箱体结构的钢板,幅板和法兰之间增加加强钢板。通过这些钢板的加强,来保证刀盘的整体结构。

#### 4.3 刀盘整体耐磨处理

1)在刀盘幅板正面外围区域增加耐磨钢板,耐磨钢板材料为hardox500,厚度20 mm;在刀盘幅板靠近中心部位贴焊10 mm耐磨钢板,并在幅板正面增加焊接撕裂刀来提高刀盘的耐磨性。

2)盾构机掘进距离长,地质条件复杂,刀盘外圈线速度最大,磨损也最严重,所以在现有基础上

增加 40 道保径刀,平均每道保径刀间距 0.9 m,同时在原有耐磨堆焊空隙部位采取焊接耐磨三角块、增加耐磨堆焊的方式增强刀盘耐磨性能。

3) 刀盘外圈与正面倒角位置磨损最为严重,其原因是周边刮刀磨损后导致该位置磨损,所以在短刀梁两侧焊接耐磨撕裂刀,同时撕裂刀两侧各增加两把合金刀,与短刀梁上的滚刀、周边刮刀、焊接撕裂刀共同保护刀盘倒角位置,提高刀盘的耐磨性。

4) 在幅板、辐条所有溜碴口位置贴焊耐磨钢板及堆焊耐磨层,增强耐磨性能。

5) 对增加的滚刀刀座及新增刀具采取堆焊耐磨焊进行保护。

#### 4.4 冲刷系统改造

盾构隧道东段粘土含量较高,为防止粘土层将刀盘刀具粘住及刀盘中心形成泥饼,特增加一套冲刷系统。

### 5 改造后刀盘刀具适应性分析及应对措施

#### 5.1 刀盘的适应性分析

1) 改造后的刀盘,增加了滚刀、撕裂刀和合金刀,同时在面板不同位置加焊了耐磨焊和耐磨钢板,由刀具的主动切削替代了刀盘的被动磨损,很好地保护了刀盘本体。

2) 环境要求和地质条件对刀盘开口率的影响很大,考虑到施工过程掌子面稳定、碴流及小于 650 mm 孤石等因素,直径线采用幅条 + 面板刀盘设计,基本适应了掘削需要。同时改造后的刀盘在总开口率上基本维持了原设计,保持在 32 % 左右,但在局部开口率上进行了适当优化:改造中心鱼尾为滚刀,周边开孔增加滚刀,客观上改变了土体在刀盘面板上的运动轨迹,改善了碴土的流动性。

#### 5.2 立体切削理念的引入

以滚刀为先行刀,滚刀与切刀之间增加一层撕裂刀参与切削,滚刀、撕裂刀、切刀之间刀高差均为 20 mm。在切削过程中,撕裂刀对切刀起到了很好的保护作用,变双层切削为三层切削,实现了立体切削的需要。

#### 5.3 切刀适应性分析

在目前近 1.8 km 盾构施工过程中非正常损坏比较严重,如图 5 所示。主要原因为切刀与刀座接触部位角度太小,刀盘在旋转过程中,切刀背部及侧面受到卵石、漂石的高速冲击,导致刀具螺栓频繁、不均匀疲劳受力,螺栓被剪断,切刀掉落,掉落

的切刀锥积在开挖仓底部,刀盘转动过程中,掉落的刀具与刀盘刀具发生激烈碰撞冲击,造成了更大范围的切刀、刮刀刀具的掉落,从而导致刀盘刀具损伤比较严重,必须对掉落的刀具进行带压潜水打捞和对刀盘刀具进行恢复。

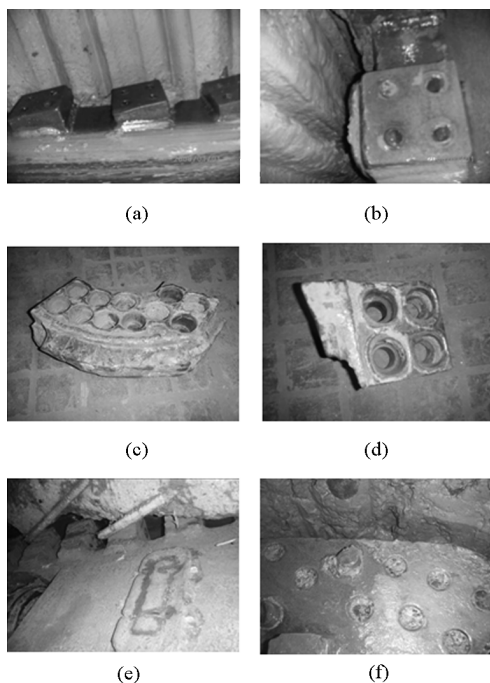


图 5 刀具掉落刀座损伤图

Fig. 5 Damage diagram of tool fall and tool apron

#### 5.4 滚刀适应性分析

直径线正面滚刀为双刃滚刀,边滚刀为单刃刀,刀间距 80 mm,施工过程中滚刀磨损基本上全部正常磨损,偏磨及刀圈断裂现象微乎其微,但是总结发现双刃滚刀磨损较单刃滚刀大,磨损量也较大,同时发现有部分双刃滚刀刀圈串轴的现象,经过分析研究,在盾构推进和刀盘转动过程中,双刃滚刀受到大粒径卵石、漂石的高速冲击,造成刀圈的串轴和刀体变形。为了减少滚刀刀具的磨损,延长刀具使用寿命,节约成本,将双刃滚刀更换为单刃滚刀,使用寿命延长了 1/3,效果明显,但是双刃刀更换为单刃滚刀后刀间距增加了,相对而言,面板上的滚刀数量显得不足,加大了砂砾石对刀盘的磨损。

#### 5.5 应对措施

1) 提高滚刀刀体及刀圈的耐磨性和使用寿命,将刀刃宽适当增大,并提高其抗冲击能力。同时严格控制滚刀的启动扭矩,不宜超过 25 N·m,高的启动扭矩对于单刃滚刀而言,开挖面无法提供足够的

反力来克服启动扭矩和阻力扭矩。

2)调整好泥水系统的泥浆配比,开挖仓注入适量的膨润土,提高碴土的流动性,减少碴土在刀箱里结块,降低对刀具和刀盘的磨蚀。

3)根据地质情况及刀盘刀具的性能特点,选择合理的刀盘转速、扭矩、贯入度、盾构推力、推进速度等关键技术参数,有利于改善刀盘、刀具的非正常磨损。

4)密切关注地层地质的变化情况,及时调整刀盘刀具的配置类型和盾构掘进参数,并不断采用新工艺、新技术,试用新型刀具。

5)及时带压进仓检查更换刀具,复紧刀具螺栓,掉落到开挖仓的刀具必须及时打捞,并对刀盘刀具损伤情况及时反馈评估,及时恢复损伤的刀盘刀具。

### 5.6 刀盘刀具改造前后效果对比分析

1)掘进参数对比(见表3)。从表3分析数据表明:改造后的刀盘参数在掘进速度、刀盘转速和贯入度基本不变的前提下,刀盘扭矩和刀盘推力发生了一些变化,改造后的刀盘扭矩和推力峰值更小,并且更趋于稳定。

表3 掘进参数对比表

Table 3 Comparison table of driving parameter

参数	改造前	改造后
刀盘扭矩/(kN·m)	1 314 ~ 9 397	780 ~ 8 149
掘进速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	12 ~ 18	12 ~ 18
刀盘转速/(r·min <sup>-1</sup> )	0.84 ~ 1.15	0.88 ~ 1.1
刀盘推力/kN	3 306 ~ 6 332	3 091 ~ 5 807
贯入度/(mm·r <sup>-1</sup> )	10 ~ 21	10 ~ 18

2)重型撕裂刀改换成滚刀后,增加了52把撕裂刀(其中26把可更换),改造后的刀具滚刀作为先行刀,滚刀、撕裂刀、切刀之间刀高差各相差20 mm,实现了立体切削。立体切削的实现,对刀盘刀具的保护更为突出;首先是刀具切削作用有了对明显的分工,滚刀、撕裂刀、切刀随贯入度和刀具

磨损程度的变化依次参与土体切削;其次是立体切削更有利于切削后的碴土在刀盘面板上的流动,减少了碴土对刀盘刀具的二次磨损。

3)重型撕裂刀更换成滚刀后,刀间距在不同位置有不同程度的增大,采用了两种补救措施:一是在刀间距较大部位使用双刃滚刀;二是在刀盘幅条上增加撕裂刀。

## 6 刀盘刀具二次改造

经过改造的盾构顺利完成了1.8 km的掘进,但由于北京直径线的地质特点,造成盾构刀盘切刀大范围掉落,并间接破坏刀盘上其他完好刀具,同时盾构刀盘也磨损较为严重,因而仅通过带压进仓已不能解决上述问题,难以满足后续3.4 km的掘进任务,必须对刀盘上切刀及刀座形式进行改造和对刀盘损伤磨损的部位进行带压焊接耐磨焊,避免类似现象再次发生。结合直径线盾构隧道复杂地质条件及沿线主要风险点与周边建/构筑物位置关系和沉降指标等要求,选择在宣武门西侧DK5+028处通过带压进仓,在仓内进行焊接动火作业完成刀盘刀具二次检修改造(见图6)。主要内容如下:

1)切刀形式由原来螺栓连接方式改为销轴连接方式,新型切刀刀座定位焊接原有刀座上。

2)刮刀刀座措施在原有刮刀刀座上重新焊接一个新刀座,安装新刀。

3)滚刀刀箱处理措施是将无法拆除的滚刀刀轴割除,拆除滚刀后补焊刀箱,安装新刀。

4)在刀盘外周焊接周边保护刀,保证刀盘圆周的耐磨性及开挖直径。在刀盘面板上焊接耐磨撕裂刀,目的在于减少刀盘的磨损和减小刀盘旋转切削过程中切刀的受力。

5)针对刀盘的磨损情况进行耐磨补焊,主要部位有刀盘正面、倒角、外圆、背部切口环及其刀具刀座和刀盘开口等部位。

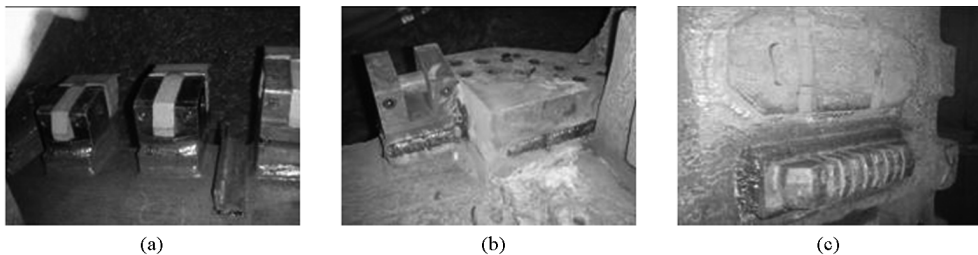


图6 刀具改造效果图

Fig. 6 Effect drawing of tool transformation

## 7 结语

通过直径线先后两次刀盘刀具配置的应用对比,得出如下结论:

1)通过滚刀、撕裂刀、切刀等长短刀具的合理配置,可以实现对砂卵石地层的有效切削。

2)对致密的砂卵石地层的刀盘刀具配置采用盘形滚刀是必要的,并应根据卵石粒径、密实程度尽量加大滚刀尺寸,加大1、2层刀高差,以提高切削贯入度,提高掘削效率。

3)滚刀、撕裂刀的可互换确保了盾构对软硬不均地层的适应。

4)通过增加刀具数量、加密轨迹能有效地适应砂卵石地层的切削。

5)刀高差增加,将会影响到刀体和刀盘强度及刚度,应在设计过程中予以加强。

6)砂卵石地层中的刀具磨损问题仍然非常严重,定期带压进仓进行刀具更换应作为一个工序进行管理,同时应加强刀具磨损自动化检测、刀具耐磨性材料的研究,以有效延长刀具的一次掘进距离,降低其磨损系数。

### 参考文献

- [1] 刘建航,侯学渊.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991.
- [2]  $\phi 12.04$  m 膨润土-气垫式泥水平衡盾构机刀盘改造技术文件.
- [3] 楼如岳.最新泥水盾构施工技术[J].上海隧道股份,2003(3): 27-30.

## The adaptability analysis of cutter tool to slurry shield of Beijing railway underground diameter line

He Feng, Li Xiaogang, Sun Shanhui

(Beijing Underground Diameter Project Department, China Railway Tunnel Group, Beijing 100045, China)

[Abstract] Based on the underground diameter line engineering experience from Beijing railway station to Beijing railway west station, through the application contrast of various cutter tool configurations under sandy gravel, a detailed comparative analysis of cutter tool adaptability was done focusing before and after transformation. The key issues were proposed about cutter tool configuration under sandy gravel, which can be reference to similar projects.

[Key words] diameter line; slurry shield; cutter tool; adaptability