

# 拉顶结合新型矩形掘进机的研制及其应用

乔华山, 张 辉, 杨述起, 王中兵

(上海广联建设发展有限公司, 上海 200438)

**摘 要:**介绍了一种适用于微型工作井并采用拉顶式工艺施工的新型矩形掘进机的设计思路和设计方法及其主要的技术参数。新型矩形掘进机与掘进系统的拉进动力配合,解决了常规矩形顶管施工中的机头在轴线方向的倾偏及后退问题;机头采用多刀盘设计,各刀盘可以实现正反转,且转速可任意调节,有效降低了机头的偏转;而采用了辅助的纠偏装置,使新型掘进机在只有顶进动力的情况下也能实现正常的顶进施工。对在复杂环境条件下,改造、提升原有的掘进机性能具有重要的参考意义。

**关键词:**掘进机;拉顶式施工;矩形通道;顶管

**中图分类号:**U455.47 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2012)03-0072-05

**Development of New Jacking-pulling Rectangular Driving Machine and the Application/** QIAO Hua-shan, ZHANG Hui, YANG Shu-qi, WANG Zhong-bing (Shanghai Guanglian Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

**Abstract:** A new rectangular driving machine is introduced about its design method and its main technical parameters, which is suitable for micro working well with jacking-pulling construction technology. Combining the pulling force of driving system with the driving machine, deflection and backward of the machine head are solved in common rectangular pipe jacking construction. The machine head is designed with multi-cutter, each cutter is positive inversion and rotary speed can be easily adjusted with less machine head deflecting. The new driving machine can also be operated only with jacking force.

**Key words:** driving machine; jacking-pulling construction; rectangular; pipe jacking

## 1 问题的提出

上海市轨道交通二号线东延伸段张江高科站一号出入口地下矩形通道,建于车站主体结构北侧,靠近祖冲之路上中科院上海药物研究所的危险品仓库及篮球场,由北向南分别穿越祖冲之路上的22万V电力排管、18孔电信排管、 $\varnothing 500$  mm上水管线、 $\varnothing 300$  mm煤气管线、 $\varnothing 2400$  mm雨水管等市政管线。通道截面为6 m $\times$ 4 m,长度23.5 m,通道上端覆土深7.5 m。

受既有建筑物及管线的影响,工作井在通道轴线方向内部结构净尺寸仅6.0 m,接收井位于 $\varnothing 2400$  mm雨水管与已建成的张江高科车站主体结构地下连续墙之间,受其限制,接收井在通道轴线方向内部结构净空尺寸仅2.4 m,机头长度必须小于2.4 m方能从接收井内吊出。而矩形通道穿越的祖冲之路是张江高科技园区一条交通主干道,车流量大,且分布着多条市政管线,要求施工中应严格控制地面及地下管线沉降。

目前常用的矩形顶管工作井在轴线方向内部结构净空尺寸须达到8.0 m方满足矩形顶管施工要求。若在轴线方向内部结构净空尺寸仅6.0 m的微型

工作井的情况下,开展矩形顶管施工,必须将机头后纠偏段取消,但带来的另一个问题是顶进过程中机头偏斜方向无法修正。再者即使纠偏段不取消,由于施工过程中对机头的纠偏,使得机头正面土体受到扰动,地面及地下管线不可避免地产生较大沉降,施工对周围环境的影响难以控制。

因此,在大幅度缩短掘进机长度后,能有效控制掘进机前进姿态,最大限度控制掘进机掘进时对土体的扰动和保证迎土面土体稳定,需要在顶进工艺基础上,将顶进工艺改进成拉顶结合工艺,即管节前进的阻力主要由工作井内主顶油缸的顶力来克服,管节前进过程中机头的姿态由机头前方的拉索来控制,即采用“拉顶结合”的施工工艺,既保证了动力,又保证了机头姿态。

必须设计制造出新型的掘进机头,使其适应微型工作井和“拉顶结合施工”条件,且能有效控制掘进机前进姿态,既是本项目矩形通道拉顶结合施工对掘进机的要求也是施工的难点。

## 2 拉顶结合施工的掘进系统简介

如图1所示,采用拉顶结合技术施工需要的施

收稿日期:2012-01-16

作者简介:乔华山(1963-),男(汉族),上海人,上海广联建设发展有限公司副总工程师,机械专业,从事传动机械的设计工作,上海市杨浦区国伟路135号10号楼206室,13816688065@139.com。

工设备及附属配套装置较多,主要有水平定向钻机、拉进千斤顶、钢拉索、掘进机头、顶进千斤顶、拉顶同步液压系统、电控系统、监测系统。

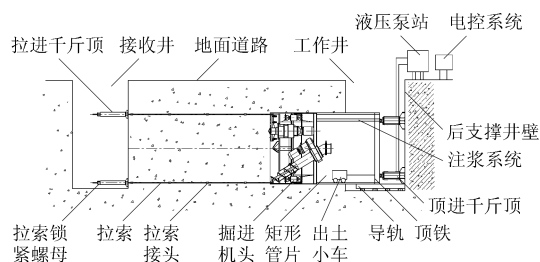


图1 拉顶结合掘进系统的设备布置

### 3 新型矩形掘进机的研制

#### 3.1 刀盘的布置形式及刀盘结构的确定

##### 3.1.1 常见矩形刀盘的刀盘布置形式及特征分析

大型矩形管道的掘进机头的刀盘的布置形式对刀盘的断面切削比、掘进机机头的长度有着较大的影响。常见的大型矩形管道掘进机头刀盘的布置形式有方形刀盘、多刀盘组合等。其主要特征如下。

##### 3.1.1.1 方形刀盘

工作面上的土体破碎是通过一个绕曲柄轴进行偏心转动的方形刀盘(或方形切削框架)来完成的,方形刀盘(或方形切削框架)可安装在一个或数个曲柄轴上。如图2所示。方形刀盘的优点是断面切削比高,最高甚至可以达到全断面的98%以上。但其不足之处是:方形刀盘摆动幅度大,对土体扰动幅度大,扰动频率高,上覆土体及管线的沉降变形控制难度大。

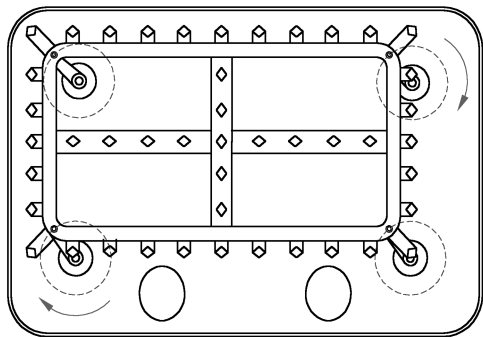


图2 方形刀盘布置

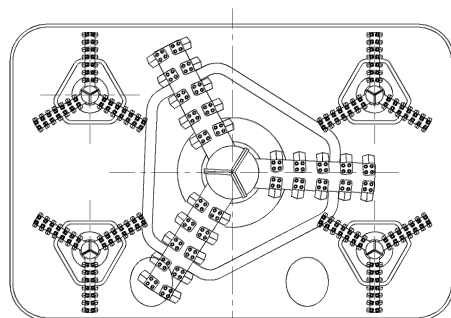
##### 3.1.1.2 多刀盘

工作面上的土体破碎是通过若干个刀盘同时工作来完成的。多刀盘的布置有多种的组合方式。

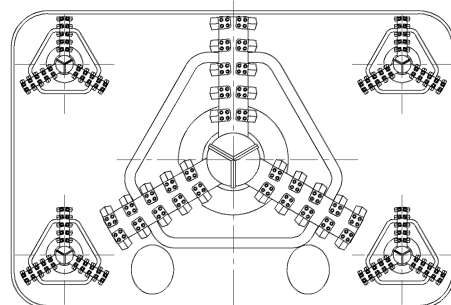
(1)一个主刀盘和若干个辅助刀盘不在同一断面上布置(主辅刀盘在掘进方向上前后布置)的组合,如图3(a)所示。

(2)一个主刀盘和若干个辅助刀盘在同一断面上布置的组合,如图3(b)所示。

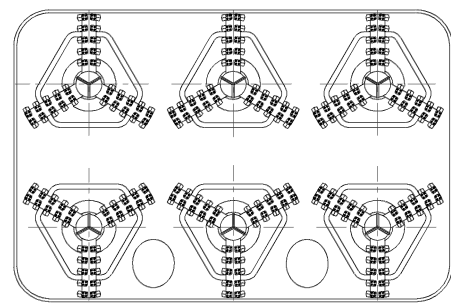
(3)若干个相同刀盘在同一断面上布置的组合,如图3(c)所示。



(a) 主辅刀盘在不同断面



(b) 主辅刀盘在同一断面



(c) 相同刀盘在同一断面

图3 多刀盘布置

多刀盘的优点是制造简单,适应性强,切削过程控制灵活。多刀盘在不同断面上布置形式,因其刀盘不是布置在同一断面上,辅助刀盘可采用较大直径,其断面切削比较高,由于矩形管道的宽高比的不同,断面切削比有差异,最大时断面切削比可达到90%,但此布置形式机头的轴向尺寸较长,不适应微型工作井的安装;而同一断面的布置形式不管是主辅多刀盘布置形式,还是若干个相同刀盘布置形式,其断面切削比都较低,最大也只有80%左右,机头的轴向尺寸相比刀盘不是布置在同一断面的形式要短很多,对工作井的长度要求相对要小。

采用主辅刀盘的布置形式时,由于主刀盘切削

断面较大,对切削面的土体扰动较大;主辅刀盘的布置形式,主刀盘切削扭矩较大,且方向单一,切削力矩较难平衡,机头容易偏转,而频繁的纠偏又加剧了对土体的扰动。

### 3.1.2 刀盘布置形式的确定

近年来,大型土压平衡的掘进机采用主辅多刀盘不在同一断面布置形式和若干个相同刀盘在同一断面布置形式的机头较多。但由于其是非全断面切削,因此,该形式的掘进机适应的地质条件有一定的限制,同时,在掘进施工中,机头切削区域的土压控制、机头前进姿态的控制和纠偏方式显得尤其重要。

通过以上分析可以看出,由于工作井的有效长度的限制,如采用1个主刀盘,4个辅刀盘同一断面布置形式的机头,主刀盘的直径较大,其传动系统增大,机头的轴向尺寸不仅增大,其断面切削比反而减小;如采用主辅刀盘前后交错布置可较大幅度提高断面切削比,但机头的轴向尺寸会更大,而受本工程的微型工作井尺寸的限制,根本无法安装此形式掘进系统。

以本工程为例,如采用主辅刀盘前后布置形式其机头的轴向尺寸要比多刀盘同一断面布置形式的机头长700 mm以上。多刀盘同一断面布置形式的机头其刀盘部分的长度约为500 mm,主辅刀盘前后布置形式机头其刀盘部分的长度至少为1200 mm。同时根据工程的地质条件,其对掘进机的断面切削比敏感度要求不高,采用等直径的6个刀盘在同一断面布置的形式,其断面切削比也能达到79%,这样既满足了微型工作井的安装需要,又有一定的断面切削比,确保了机头的切削性能。

### 3.1.3 刀盘结构的确定

考虑到拉索锚座设定的位置,使机头便于拉索控制,而有利于机头实现拉进的功能。新型掘进机机头刀盘由6个 $\varnothing 1930$  mm的辐条式全开口刀盘组成。使土舱的土压与切削面的土压完全一致,实现了真正意义上的土压平衡。为了刀盘方便维修与更换切削齿,切削齿与刀盘幅板采用螺栓连接。

在刀盘辐板后背各设计有搅拌棒,用以搅碎切削的土体,经过搅拌后的土体具有良好的塑性和流动性,又有较好的止水性。为减少断面切削比较低对切削性能的影响,在刀盘最大空隙间设有二处固定的破土锥刀,用锥刀的斜侧面挤顶破土。

## 3.2 机头壳体结构形式的确定

### 3.2.1 常用大型掘进机头壳体结构联接形式及特点分析

常用大型掘进机头的结构形式有三段双铰和二段一铰2种。

(1)所谓三段双铰即该掘进机机头由前、中、后三段组成,如图4所示。前段与中段之间设置有一对垂直铰接,通过左右纠偏油缸的伸缩,以实现前段绕垂直铰轴左右转动;同样,中段与后段还设置有一对水平铰接,通过上下纠偏油缸的伸缩,以实现中段带动前段绕水平铰轴上下转动。由此控制,可实现掘进机头在掘进中的纠偏。

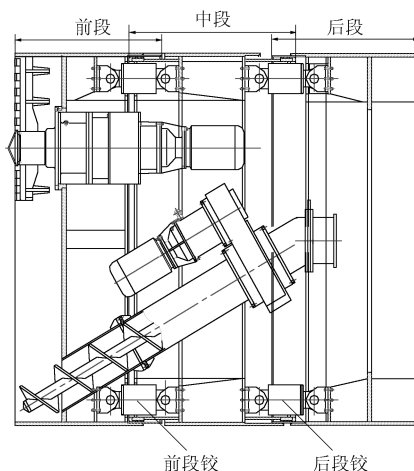


图4 三段双铰联接形式

该结构机头的上下与左右纠偏机构的分开设置,既使各自的功能互不干扰、受力明确,又使段与段之间不会发生脱开现象。前段与铰座之间采用螺栓连接,既便于拆卸,又方便根据不同的土质条件更换不同类型的机头前段。该结构机头的总体长度较长,因此需要较大的工作井才能安装。机头前进的灵敏度较大。

(2)所谓二段一铰即该掘进机机头由前、后二段组成,如图5所示。前、后段之间通过纠偏油缸铰接。通过纠偏油缸的伸缩,以实现前段上下、左右的纠偏。

该结构机头的上下、左右的纠偏是在同一断面上同时进行的,上下、左右纠偏的干扰较大,纠偏控制较为复杂。该结构机头的总体长度与三段双铰型机头相比要短,因此较小的工作井也能安装。但机头前进的灵敏度比较小。

### 3.2.2 机头结构形式的确定

从以上分析可知,无论是三段双铰结构形式的机头还是二段一铰结构形式的机头的长度都较长。

大型掘进机头的结构形式设计成多段加铰接的形式,主要是由于机头纠偏的需要。而拉顶结合施工工艺中,拉进力就可以起导向、扶正机头纠偏的作用,如将机头设计成一段壳体,那长度就可大大缩

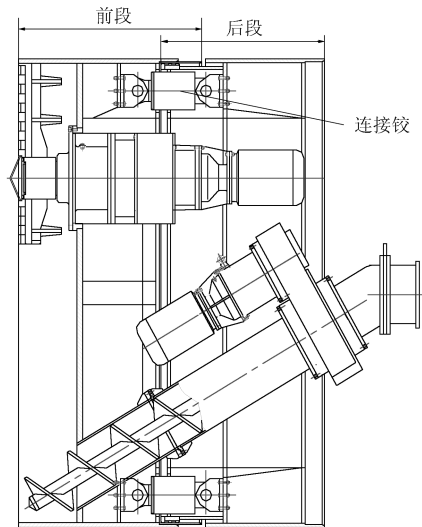


图5 二段一铰联接形式

短。但管节正常行进时,为了稳定保持管线的走向,又希望机头长些。同时由于刀盘传动装置长度的要求,机头又要具有一定的长度。

因此本工程微型工作井只能采用二段一铰结构形式的机头。

### 3.2.3 机头壳体联接密封及铰接

本工程掘进机壳体,设计由前、后矩形筒体相套组成。套接处设置2道鹰嘴形橡胶密封止水环。

壳体前后两段由10只铰接油缸相连接,矩形宽度方向上下各3只,高度方向左右各2只,可使两壳体绕顶进轴线作相对折角 $2.1^\circ$ 及轴向约100 mm的伸缩变化。10只铰接油缸既起到铰接的作用又可起到辅助纠偏的作用。

### 3.2.4 前壳体刀盘上方帽檐的设置

本工程由于穿越的祖冲之路管线多、复杂,因此要求掘进机在掘进过程中对土体的扰动越小越好。而当矩形通道进洞时,毗邻的 $\varnothing 2400$  mm雨水管线的安全更显重要。为保证毗邻 $\varnothing 2400$  mm雨水管线的安全,减小刀盘切削时非全断面切削对土体的扰动和保证迎土面土体稳定,最大限度地控制地表的隆起和沉降,在掘进机前端(刀盘端)设置长度500 mm的帽檐。

### 3.3 机头壳体拉进锚座的设计

根据工程微型工作井的需要,采用“拉顶结合技术”施工。为使拉进力对机头上下、左右纠偏力矩的均衡,合理充分利用拉进力,拉索锚座点的位置以上下、左右拉力对机头迎面水平和垂直中心的力矩基本平衡为设置依据。

根据刀盘位置、机头外壳可安装拉索锚座的位置,

初步设定机头上、下部各设4个拉索锚座,各拉索锚座分别用上左1、上左2、上右1、上右2、下左1、下左2、下右1、下右2编号代替(见图6)。

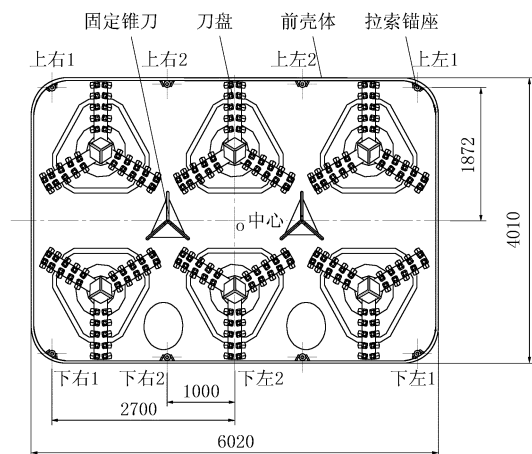


图6 拉索锚座设置

设单点的拉力为 $F_L$ ,拉点距机头迎面中心水平轴的距离为 $L_s$ ,则上(下)4个单点拉力对机头迎面中心水平轴线形成的力矩为:

$$T_s = 4L_s F_L \quad (1)$$

式中: $T_s$ ——单点拉力对机头迎面中心水平轴线形成的力矩, $N \cdot m$ ;  $L_s$ ——拉点距机头迎面中心水平轴的距离,取1.87 m。

将 $L_s$ 代入式(1)得上(下)4个单点拉力对机头迎面中心水平轴线形成的力矩为:

$$T_s = 4 \times 1.87 \times F_L = 7.48 F_L \quad (N \cdot m)$$

设拉点距机头迎面中心垂直轴线的距离为 $L_{C1}$ ,  $L_{C2}$ ,则左(右)4个单点拉力对机头迎面中心垂直轴线形成的力矩为:

$$T_c = 2F_L (L_{C1} + L_{C2}) \quad (2)$$

式中: $T_c$ ——单点拉力对机头迎面中心垂直轴线形成的力矩, $N \cdot m$ ;  $L_{C1}$ 、 $L_{C2}$ ——拉点距机头迎面中心垂直轴的距离,分别取1.0、2.7 m。

将 $L_c$ 代入式(2)得左(右)4个单点拉力对机头迎面中心垂直轴线形成的力矩为:

$$T_c = 2F_L (1 + 2.7) = 7.4 F_L \quad (N \cdot m)$$

由上述计算得: $T_s \approx T_c$

因此,在机头壳体迎土面上下边缘内侧各设计4个,共8个拉索下锚座,即按图6所示位置设置的锚座在拉进时,机头不会产生前后、上下的倾转。同样在后壳体与管片连接面内侧,也设计有8个拉索锚座,以实现管片联动拉进。

### 3.4 螺旋机出土系统设计

螺旋输送机一方面用于出土,另一方面主要是

用于控制工作面的土压力平衡。

由于掘进机机头宽度为6 m,在左右下部布置2台螺旋输送机。每台最大输送量按全断面切削的理论排土量设计。螺旋输送机的直径为500 mm,单台需要功率30 kW。

由于工作井的限制,螺旋输送机不能设计较长,为保证螺旋输送机形成的土塞的有效性避免造成水土喷冒现象,将螺旋机安装与水平成 $30^\circ$ 角,出土口最低处在1.7 m左右,方便运土小车的行走。

在螺旋输送机出土口处设有千斤顶开启的闸门,可根据工作面的土压变化稳定控制螺旋输送机的出土。

### 3.5 主要技术参数

通过以上的设计计算,适用于本工程“拉顶结合施工”的新型矩形掘进机的主要技术参数为:外包尺寸 $4010\text{ mm} \times 6020\text{ mm} \times 3635\text{ mm}$ ;前段壳体长度1450 mm;后段壳体长度1350 mm;刀盘转速 $0 \sim 2.5\text{ r/min}$ ;刀盘旋转方向正反方向任意调节;刀盘最大扭矩 $6 \times 172\text{ kN} \cdot \text{m}$ ;刀盘功率 $6 \times 45\text{ kW}$ ;刀盘直径1930 mm;刀盘数量6个;刀盘结构形式全开口;断面切削比79%;辅助纠偏千斤顶数量10个;辅助纠偏最大纠偏角度 $2.1^\circ$ ;辅助纠偏最大推力 $10 \times 1200\text{ kN}$ ;出土螺旋机输送能力 $2 \times 35\text{ m}^3/\text{h}$ ;出土螺旋机转速 $0 \sim 13\text{ r/min}$ ;拉进锚座数量16(前后各8)个;拉进锚座总拉力 $8 \times 1000\text{ kN}$ ;掘进机头自重85 t。

## 4 应用效果

上海市轨道交通二号线东延伸段张江高科站一号出入口地下矩形通道,工作井在通道轴线方向内部结构净尺寸仅6.0 m,接收井在通道轴线方向内部结构净空尺寸仅2.4 m。如采用常用的矩形顶管掘进机无法满足施工要求。新型的矩形掘进机,采用“拉顶结合施工”工艺,在大幅度缩短掘进机长度后,能有效控制掘进机前进姿态,最大限度控制掘进机掘进时对土体的扰动和保证迎土面土体稳定。

研制的新型矩形掘进机如图7所示,工程施工中,设备布置参见图1。设备安装前,先用高精度的水平定向钻,将工作井和接收井间需要铺设拉索的水平孔施工完成,然后安装新型矩形掘进机,并将接收井内的拉进系统与掘进机前面的拉进锚座用高强度的拉索连接。同样,掘进机后壳体上的拉进锚座与管片上的预埋件连接。使得拉进油缸、掘进机头、管片连成一体。施工中应随时监测机头的姿态、迎面土压的变化,及时调整拉进油缸的位移和拉进力,

确保拉进位移与顶进位移、迎面土压力相匹配。



图7 拉顶结合新型矩形掘进机

施工中拉进系统拉索的铺设、新型矩形掘进机头上拉点位置的设置、掘进机与管片的连接、管片之间的连接、拉进力与顶进力的同步及与迎面土压的匹配是应用此新型矩形掘进机的施工技术关键,也是应用此新型矩形掘进机施工与顶管掘进机施工的区别所在。

应用新型矩形掘进机,整个地下通道在施工过程中,机头完全利用拉索导向进行纠偏、止退,辅助纠偏油缸没有动作,机头姿态高程方向最大偏移为65 mm,左右为6 mm,地表变形控制在20 mm以内,所有管线控制在较好的状态,掘进机安全进洞。很显然,应用的效果是明显的。

## 5 结语

新型矩形掘进机与掘进系统的拉进动力配合,解决了常规模形顶管施工中的机头在轴线方向的倾偏和后退问题;机头采用多刀盘设计,各刀盘可以实现正反转,且转速可任意调节,有效降低了机头的偏转和轴线方向的倾偏;采用了辅助的纠偏装置,使新型掘进机在只有顶进动力的情况下也能实现正常的顶进施工。

## 参考文献:

- [1] 张照煌,李福田.全断面隧道掘进机施工技术[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [2] 韩选江.大型地下顶管施工技术原理及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [3] 史钊.公路、桥梁、隧道施工新技术、新工艺与验收规范实务全书[M].北京:金版电子出版社,2002.
- [4] 成大先.机械设计手册[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [5] 李淑海,张志勇,王中兵.复杂环境中的地下暗埋箱涵拉顶式施工技术与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(7).