

无水砂卵石地层盾构机选型风险分析与控制

高丽娟

新疆维吾尔自治区交通建设管理局, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年6月5日; 录用日期: 2022年6月15日; 发布日期: 2022年6月28日

摘要

盾构法作为地铁施工的专项工程技术, 被越来越多的工程建设单位所选择。因此, 本文介绍了国内外盾构机, 盾构机的分类和选用原则。无水砂卵石地层是典型的力学不稳定地层, 其颗粒间的胶结能力极差, 离散性强。基于此, 分析了无水砂卵石地层盾构机选型的风险, 提出相应的建议, 以加强对此类地层盾构机选型的认识。

关键词

盾构机, 选型, 砂卵石

Risk Analysis and Control of Shield Machine Type Selection in Anhydrous Sandy Pebble Stratum

Lijuan Gao

Traffic Construction Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi Xinjiang

Received: Jun. 5th, 2022; accepted: Jun. 15th, 2022; published: Jun. 28th, 2022

Abstract

As a special engineering technology of subway construction, shield method is selected by more and more engineering construction units. Therefore, this paper introduces the development history of shield machine at home and abroad, and the classification and selection principle of shield machine. Anhydrous sandy pebble stratum is a typical mechanically unstable stratum with poor cementation ability and strong dispersion between particles. Based on this, the risk of shield machine selection in anhydrous sandy pebble stratum is analyzed, and the corresponding suggestions are put forward, so as to strengthen the understanding of shield machine selection in this kind of stratum.

Keywords

Shield Machine, Type Selection, Sandy Pebbles

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

盾构机的出现至今已有 200 多年的历史。1818 年, Brunel 受一种食船虫在船身上打洞的启发, 研究发明了盾构施工技术[1]。进入 20 世纪 80 年代, 盾构机的发展成为第四代, 标志着盾构工法进入多样化时代[1]。无水砂卵石地层是一种典型力学不稳定地层, 卵石颗粒之间几乎没有粘接力, 故稳定性极差。在盾构施工过程中, 刀盘旋转切削非常容易打破卵石土体颗粒的原有平衡状态, 引起开挖面和洞壁失去稳定性, 进而形成“连锁反应”, 引起地表变形、下沉、周边既有管线发生过量变形与破坏。因此, 若在此地层中施工时, 选型不当则会造成选型风险。盾构施工过程中大粒径的卵石难以被破碎, 且破碎后的砂卵石向外运输也是十分困难的。第二, 卵石地层的摩擦阻力大, 导致刀盘所受的力矩作用较大, 当渣土改良系统设计不完备时, 会导致力矩突增, 导致堵塞。且当土室不建立压力时, 易引起地表沉降。因此, 防止刀盘堵塞转动是选型的重要考虑因素。第三, 该土层卵石粒径大, 容易造成刀盘卡死现象, 因此须在选型时考虑刀盘的主驱动力矩。另要注意刀盘刀具的维护保养, 因其摩擦力大的缘故, 需要定时保养, 也易造成风险。最后, 由于地铁线路一般穿插城市主干道, 施工过程中要注意对地面沉降量的控制以及对地下重要管道线路的保护。这也是施工选型的重要考虑因素。本文通过对无水砂卵石地层的风险识别与分析, 并结合乌鲁木齐一号线地铁建设工程的盾构选型实例, 提出几点控制方法, 为类似工程应用提供借鉴。

2. 盾构机的分类与构成

盾构机可按不同的方式进行分类(见图 1)。按断面形式可分为圆形盾构, 复圆盾构与非圆盾构。按施工环境可分为软土盾构与复合盾构。按支护地层形式分为手掘式, 机械支护式, 压缩空气支护式, 泥浆支护式, 土压平衡式。根据不同的地层条件可选用不同的形式盾构机[2]。

盾构机的结构复杂, 其主体结构为刀盘, 盾体, 螺旋输送机与管道拼装机组成。其中, 刀盘为主要的切削土体与支撑抵抗切削面的作用。盾体为圆筒式的结构, 是盾构机的主要组成部分, 可分为前盾, 中盾, 尾盾三个部分。螺旋输送机的主要作用为将刀盘切削的土体排出盾构, 清理渣土。由各种管道拼接而成的后处理系统, 可进行相应的注浆工作。

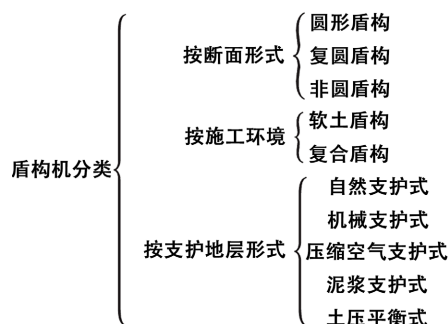


Figure 1. Classification of shield machine

图 1. 盾构机分类

3. 盾构机的选型原则

盾构作为地铁施工时的专用机械设备，针对一个工程来说，其成本与效益，施工的技术水平，都是由盾构机的选型成功与否决定[3]。其基本原则为适用性与可靠性，选型时应综合考虑施工时穿越的地层条件，例如一些地下重要的建筑物，地层的土质状况，以及考虑区间埋深与隧道直径。根据已有的盾构经验加以创造革新，做出合理决策与施工方案。

3.1. 影响盾构机选型的不利因素

1) 地下重要建筑物与设施。盾构机作用于地铁施工时，需要穿越重要房屋的基层，重要的管线管道等，例如电网，水网，燃气管线等。因此，如果盾构机的选型不当，则会引起土体流失甚至是坍塌的危险。在不同的工程背景下，需提前做好地质勘探工作，掌握准确的地质资料，合理制定盾构推进的方案，保证施工的各种效益达到平衡。

2) 地质条件。工程中具有的地质条件往往复杂多变，一个地段可能包含多种土质情况，穿越沙砾，中砂，粉质粘土，粉细砂等[4]。对于盾构机的选型影响较大，不同的地质条件需要不同盾构机的配置。以保证不出现漏水与漏砂现象，保证土压力的平衡。

3) 区间埋深与隧道直径。由于实际工况不同，不同地铁工程中，由于各区间所要求的埋设深度情况与隧道直径之间存在明显差异，因此对于盾构机设备的规格型号以及性能有着严格要求。例如上海长江隧道的“南隧”部分便是由两台直径达 15.43 米的盾构机推进，而黄浦江下上海上中路隧道工程的双管隧道是由直径为 14.87 米的“环龙号”推进，其攻克黄浦江防汛大堤，超浅覆土等世界难题。

3.2. 选型原则

盾构型式多样，在工程中采用什么样的盾构机类型，受地层的渗透性、颗粒级配、岩石的耐磨性、水压等影响，同时还要考虑环保、工程地质、安全性、经济性等因素。选择盾构机类型必须遵守五个基本原则：

原则 1：适应工程地质条件，确保施工绝对安全。

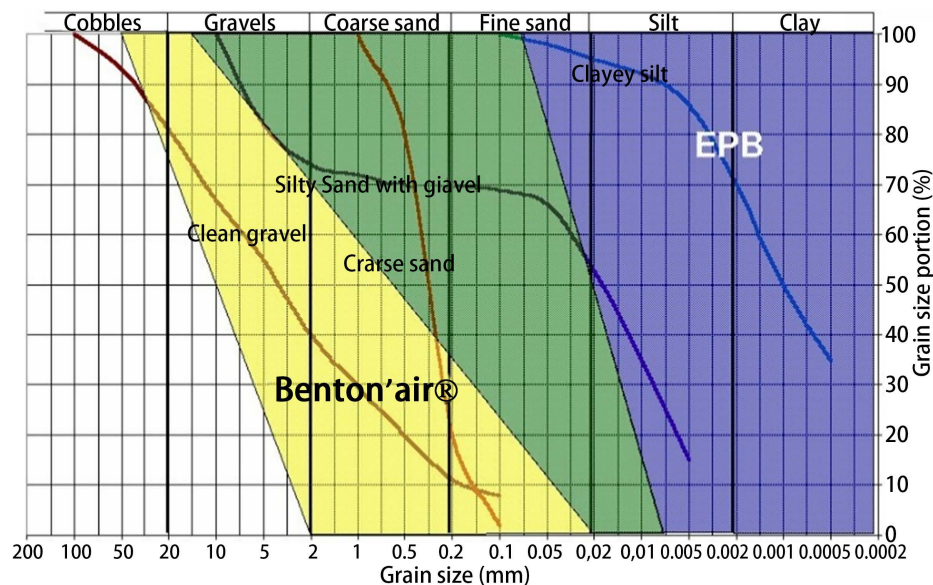


Figure 2. Relationship between shield type and particle gradation

图 2. 盾构类型与颗粒级配关系

原则 2: 盾构的性能应能满足工程推进的施工长度和线形的要求。

原则 3: 盾构机的掘进能力可与后续设备、始发基地等施工设备匹配。

原则 4: 对周围环境影响小。

原则 5: 施工可以采用合理的辅助工法。

图 2 描述了盾构类型与颗粒级配的关系图[2]。

4. 无水砂卵石地层盾构机选型及风险识别、分析与控制

无水砂卵石地层是由很多形状不同、大小不同的颗粒构成,其物理性质与细粒土有很大的区别,并且又不同于固体和液体,介于两者之间[5]。其抗拉性质比较弱,但是有较好的抗压与抗剪能力。无水砂卵石地层是典型的不稳定地层,颗粒间的孔隙率大,因由不同的颗粒组成,相互之间无粘接力,这会对施工产生很大的影响。

4.1. 无水砂卵石地层盾构机选型风险识别

1) 由于砂卵石本身的性质,在盾构推进过程中,盾构机刀盘与其颗粒之间存在不同摩擦系数,导致产生不同的摩擦力[6]。因此,若选型不当会导致刀盘损坏,且当切削的土体充满土室时,将引起“堵塞”现象,导致盾构机无法继续推进。由磨损导致的刀具更换前后对比如图 3 所示。

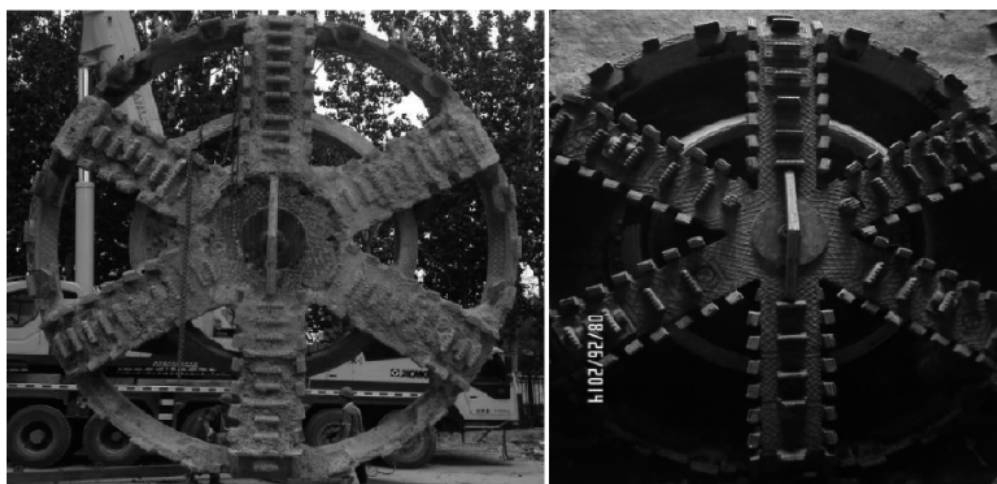


Figure 3. Tool comparison diagram

图 3. 刀具对比图

2) 盾构机刀盘开口率是指刀盘开口区域面积占刀盘总面积的百分比。当开口率过小时,会造成切削的土无法及时进入土室,而会粘连在刀盘上,增大扭矩,导致盾构机长期处于超负荷工作状态,影响施工进度,并造成施工风险。

3) 砂卵石地层的典型特点是流动性差,因此盾构机推进时造成的渣土如果不能及时排出,导致堆积,最终导致扭矩过大,千斤顶负载运作,造成推进速度慢。

4) 在盾构施工过程中,都需要用刀具切割岩体,从而达到碎石掘进的效果。因此,影响刀具磨损的主要因素在于岩石的耐磨性,其与刀具之间的摩擦力直接影响刀具的磨损程度。无水砂卵石地层的特性导致刀盘面板与刀具磨损程度大大增加,如果刀盘材料有缺陷,易出现刀片或刀圈断裂情况(见图 4)。若刀具密封效果差,造成泥沙进入刀具内部造成轴承损坏,使刀圈产生偏磨(见图 5)给施工带来风险。



Figure 4. Knife ring fracture

图 4. 刀圈断裂



Figure 5. Bearing damage (left) and cutter ring eccentric wear (right)

图 5. 轴承损坏(左)与刀圈偏磨(右)

4.2. 无水砂卵石地层盾构机选型风险分析

无水砂卵石地层的力学性质是不稳定的，因为颗粒大小不一，对盾构施工存在显著的不良影响，据工程实例综合分析具备如下风险：

- 1) 盾构刀盘磨损。大量砂砾石细颗粒会不断冲刷刀盘面板，对刀盘磨损量大。卵石会跟随刀盘转动，对刀具造成严重磨损和冲击。此时不得不开仓进行刀盘补焊和刀具更换，存在较大的安全风险。
- 2) 破碎机故障。由于盾构机在卵石含量极高的地层掘进，破碎机的工作时间极高，需要连续不断地破碎卵石，块石等，因此很容易导致破碎机零部件疲劳破坏，人工在维修破碎机时也具有一定的安全风险。
- 3) 渣土流动性问题。渣土不易改良且流动性差，这是无水砂卵石地层盾构施工中的常见问题。如果渣土改良设计不佳或使用不当，将导致刀盘扭矩过大，导致推进速度慢甚至是盾构无法继续推进。
- 4) 盾构刀盘卡死现象。在盾构施工中，刀盘被泥饼糊住，造成切土无力现象，扭矩变大，电机无力带动刀盘转动，造成卡死现象。
- 5) 盾构施工过程地表沉降。在盾构推进过程中，由于对周围土体进行扰动，地层由原来的稳定平衡状态转变为不稳定状态，会造成较大的地层损失，若控制不当，还会致使地层坍塌，造成严重损失。因此，施工过程中应当严格控制地表沉降量。

4.3. 无水砂卵石地层盾构机选型风险控制

- 1) 防止盾构刀盘被卡措施

- ① 严格控制推进速度与刀盘的转速,既可保持开挖面的平衡和稳定,又有利于保护刀具、降低磨损。
- ② 合理控制盾构推进力。
- ③ 实时地监测控制刀盘扭矩的变化,防止刀盘无法转动。
- ④ 注意在无水砂卵石层施工时,注意均衡连续施工,不要持续的负荷运作。

2) 刀盘过度磨损控制

- ① 加强盾构关键部位的耐磨性,在刀盘处设法增加其耐磨性,焊接耐磨块。
- ② 不定期有计划的检查刀具,进行合理的维护与更换。
- ③ 制定合理的施工方案,最大限度降低刀盘的磨损。

3) 破碎机故障控制措施

破碎机频繁工作破碎卵石、块石,使得链接销比较容易疲劳断裂,因此要充分做好链接销的保护。

4) 土体塑流化改良措施

在盾构机掘进过程中,砂卵石地层中刀具磨损严重、刀盘推力和扭矩大,对地层扰动大。会造成地基土不均匀沉降,通过对砂卵石进行流塑性改良同时可以较好地控制沉降。目前,比较常用的改善土体流动性方法为:使用高分散泥、增加泥浆中粘土含量、加入有机或无机增黏剂等。可以有效降低土体颗粒之间与刀盘,刀具之间摩阻力,方便土体排出。

5. 乌鲁木齐地铁一号线无水砂卵石地层盾构机选型

5.1. 乌鲁木齐地铁一号线地层特点

乌鲁木齐轨道交通一号隧道穿越地层主要为中密、密实的无水卵石层,无水砂卵石是对自然土中所有以漂石(块石)、卵石(碎石)、砾石(角砾)为主,含有少量砂土和粘性土粒的离散粗碎屑堆积物的统称。此地层特点为卵石含量极高而水含量极低。大多为松散颗粒,因此几乎不具备抗拉能力,只能承受压应力与较小的抗剪力。且几乎无粘结力。

5.2. 乌鲁木齐地铁一号线的盾构选型

乌鲁木齐轨道交通一号通过区场地内主要地层为由冲积、洪积河床堆积形成的松散堆积层,以及下伏的侏罗系(J)、三叠系(T)、二叠系(P)的泥岩、砂岩和砾岩构成,地表主要分布人工素填土和杂填土。隧道穿过的地层主要为中高等密实的卵石层,局部有砂砾与碎石。故摩擦阻力较大,刀盘不仅磨损较大且会受较大的搅拌力矩。综合考虑本工程的地质资料,施工条件,环境保护及运作成本,采用 CTE6440 复合盾构机(图 6 所示)。



Figure 6. CTE6440 composite shield machine
图 6. CTE6440 复合盾构机

5.3. 乌鲁木齐地铁一号线盾构配置

轨道交通一号线 CTE6440 复合盾构机，是由刀盘，主驱动，后配套系统作为主体组成。满足基本盾构选型的原则下，针对该工程施工现场的地质条件与环境，借鉴类似地层条件国内其他工程的设计经验而制造。

1) 刀盘

针对轨道交通一号线土建的地质条件，刀盘的刀具需要具有耐冲击、耐磨损、耐二次磨损的性能，采用以滚刀为主或撕裂刀为主的两种刀盘。刀盘采用准面板结构设计，主要结构为辐条 + 面板，开口率为 40%，使刀盘开口和螺旋输送机通过最大粒径相匹配，见图 7。

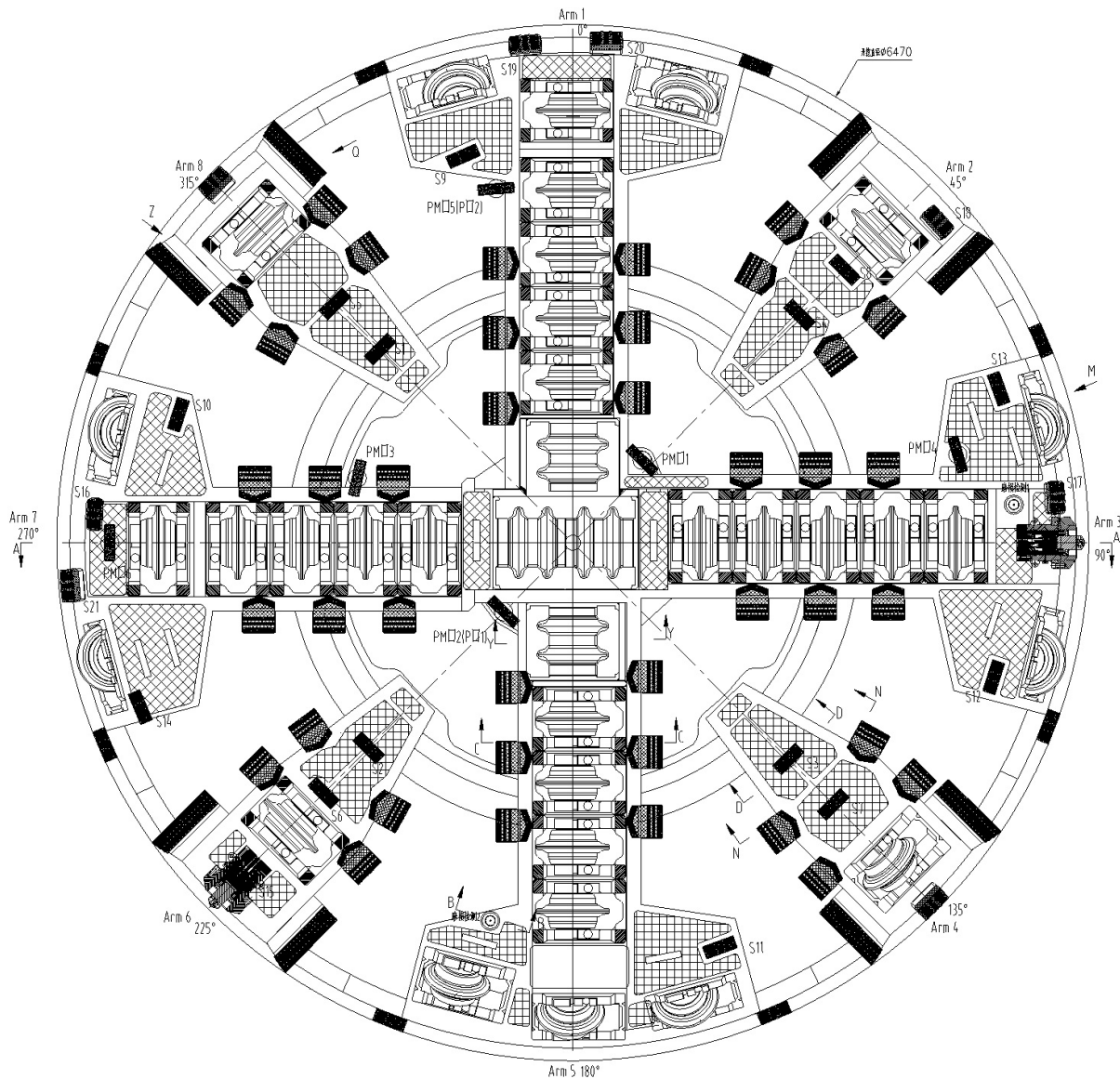


Figure 7. Schematic diagram of cutter head structure

图 7. 刀盘结构示意图

2) 主驱动系统

主驱系统构包括主轴承、液压马达、减速器和安装在后配套拖车上的主驱动压泵站。由于该地层的特殊性，需要提高扭矩，因此安装 8 组驱动，额定扭矩 6000 kNm，最高转速 3.7 r/min 的液压方式驱动，脱困扭矩 7200 kNm。可以满足掘进要求。

3) 后配套系统

后配套系统主要包含如下：

- ① 管道运输系统。作用为便于渣土及时排出。主要由管道与螺旋输送机组成。
- ② 泡沫注入系统(见图 8)。主要作用对渣土进行改良，泡沫系统由泡沫泵、高压水泵、电磁流量阀、泡沫发生器、压力传感器、管路组成。



Figure 8. Foam system
图 8. 泡沫系统

③ 同步注浆系统。此盾构采用的是同步注浆系统，在管路的注入端安装了压力传感器，用于检测注浆压力。达到自动注浆目的。

④ 人舱设计。人员舱是在土舱保压期间人员出入土舱进行维修和检查的转换通道，出入土舱的工具和材料也由此通过。此盾构人舱外观与内部结构设计详见图 9。

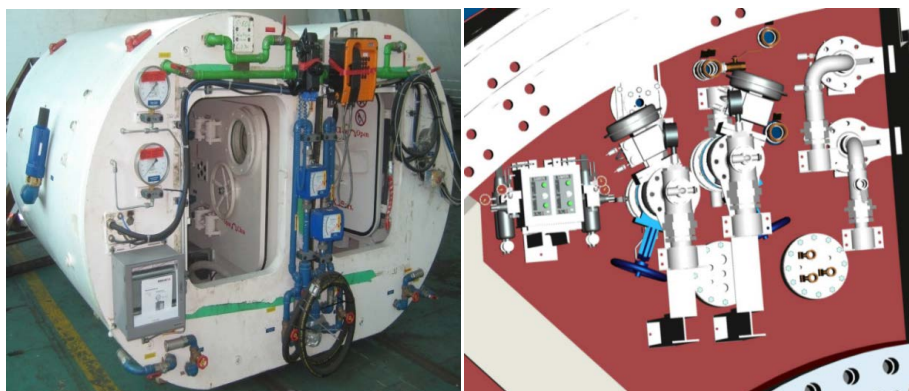


Figure 9. Passenger compartment design
图 9. 人舱设计

6. 结论

本文详细地介绍了盾构机的发展历史，盾构机的分类以及盾构机的选型原则。并且提出了无水砂卵石地层盾构机选型的风险，分析与控制。提出了一些无水砂卵石地层下盾构机选型的风险，并加之分析，最后提出针对性的建议。盾构技术作为地铁施工的专项施工方法，在面对各种各样的地质条件下，其施

工方法还有待改进完善。我国的盾构技术还存在“卡脖子”现象，因此，快速发展我国的盾构技术亟待重要。

参考文献

- [1] 俞凯. 浅谈盾构机的发展史及其在我国的发展状况[J]. 科协论坛(下半月), 2007(6): 38.
- [2] 田松. 盾构机施工法在地铁工程中的设计与应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [3] 陈曦. 中国盾构从这里开始[J]. 装备制造, 2008(5): 20-27.
- [4] 王建辉. 地铁施工盾构机选型及施工组织探讨[J]. 中国设备工程, 2021(21): 197-199.
- [5] 刘桂宾. 无水砂卵石土体工程性质研究[D]: [硕士学位论文]. 烟台: 鲁东大学, 2017.
- [6] 钱新. 无水砂卵石地层土压平衡盾构刀盘防卡死关键技术[J]. 施工技术, 2020, 49(8): 120-124.