

关系和数值计算技术的发展，已有一套较完整的衬砌计算理论；由于土工试验和现场实测的深入开展，制造了许多新的室内和原位测试仪器，从而可取得反映客观实际的设计和施工管理所用的参数；加上大量盾构法隧道的相继建成，设计和施工人员积累了丰富的经验。本书的编写就是力求将理论、测试和工程经验三者的新发展，作为在我国建设更多优质盾构法隧道的参考。

本书由刘建航(上海市市政工程管理总局副总工程师)和侯学渊(同济大学教授)负责编写。在编写过程中，上海市隧道设计院乔宗昭，同济大学曾进伦、陈三江和上海市隧道工程公司白云等同志参加了很多工作，书中引用的设计、施工、理论、实测中的技术总结和科研成果，是曾参与工作的很多同志辛勤劳动的结晶，在此致以谢意。杨倩霞等同志承担了本书的描图工作；全书由曾进伦同志统一校阅。最后，热忱欢迎读者提出批评和建议。

刘建航 侯学渊

一九九一年八月

(京)新登字063号

内 容 提 要

本书介绍了用盾构法修建隧道工程(地下工程)的设计、施工的理论与实践,以及土工试验。总结了上海等地设计和施工经验以及试验研究成果,并介绍了国外的先进技术。对各地的地铁、地道等市政工程的建设有指导作用。本书的读者对象是大专院校师生、有关专业的工程技术人员和科研人员。

盾构法隧道

刘建航 侯学渊 编著

*

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑:徐建平 许虹进 封面设计:陈东山

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 13.5 字数: 293 千

1991年11月 第1版 第1次印刷

印数: 1—2000册

ISBN7-113-01023-7/TU·224 定价: 6.25元

前 言

随着我国城市建设和工矿等事业的蓬勃发展，在上层中正在修建越来越多的隧道工程。如用明挖法施工，则会破坏地面环境，影响人民生活并造成经济损失；如用一般暗挖法施工，则当土层无自承能力时，隧道无法开挖通过。故在松软地层中修建一定埋深的隧道时宜采用盾构法施工，它既适用于城市地下铁道、市政隧道和工业管道，又可应用于穿越水域和山地的公路、铁路、水工和矿山隧道。

国外自18世纪中叶建成第一条盾构法隧道以来，其设计和施工技术得到了很大发展，出现了泥水加压式和土压平衡式盾构，衬砌由铸铁转向钢筋混凝土或钢材组成。我国自50年代开始采用盾构法隧道以来，已修建了直径2~11m的多种用途隧道。如位于上海的打浦路过江隧道和延安东路过江隧道，皆为直径10m以上，由钢筋混凝土管片作为隧道结构衬砌的盾构法隧道。通过20余条盾构法隧道的实践，我国已积累了不少成功的经验。为了使盾构法隧道在全国各地推广应用，我们初步总结了上海等地的设计和施工经验以及理论和试验研究成果，并介绍国外的先进技术。如果本书对我国城市建设和工矿事业，特别对我国大中城市正在兴起的地铁建设有所裨益的话，那正是作者所期望的。

隧道工程是包围于地层介质中的一种结构物，它的设计和施工方法因地质和施工条件的复杂变化，而不能按一般化的模式解决工程问题。必须依循理论、测试和工程经验三者结合的途径因地制宜地分析和处理工程问题。随着土的本构

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 盾构法隧道概述	(1)
一、盾构法基本概念.....	(1)
二、盾构法的主要优点.....	(3)
三、盾构法存在的主要问题.....	(3)
第二节 盾构法隧道的发展历史	(4)
一、国外盾构法隧道的发展历史.....	(4)
二、我国盾构法隧道的发展历史.....	(11)
第三节 盾构法的适用范围	(18)
一、大直径盾构的适用范围.....	(18)
二、中直径盾构的适用范围.....	(20)
三、小直径盾构的适用范围.....	(20)
第二章 地质勘探和土工技术	(23)
第一节 任务与安排	(23)
一、目的和要求.....	(23)
二、勘探工作安排.....	(25)
第二节 衬砌设计中的土工问题	(33)
一、计算地层荷载的土壤参数.....	(33)
二、土体的流动性.....	(36)
三、地下水的腐蚀性.....	(38)
四、分析隧道下卧层的土体变形.....	(41)
第三节 盾构施工方案中的土工问题	(42)
一、需用盾构的地质条件.....	(42)

二、盾构选型中的地质资料·····	(49)
三、盾构最小覆土·····	(60)
第三章 衬砌结构与构造·····	(72)
第一节 结构方案的选择·····	(72)
一、隧道断面的型式·····	(72)
二、装配式衬砌分类与造型·····	(78)
三、多跨隧道结构形式·····	(84)
第二节 衬砌类型·····	(87)
一、衬砌作用与材料·····	(87)
二、铸铁管片衬砌·····	(89)
三、钢管片衬砌·····	(91)
四、挤压混凝土衬砌·····	(94)
第三节 钢筋混凝土管片·····	(94)
一、管片型式·····	(94)
二、板型管片·····	(96)
三、箱型管片·····	(105)
第四节 钢筋混凝土砌块·····	(113)
一、砌块型式·····	(114)
二、普通砌块·····	(115)
三、膨胀砌块·····	(119)
四、销接砌块·····	(120)
第五节 接头构造·····	(123)
一、有螺栓接头·····	(124)
二、无螺栓接头·····	(125)
三、销钉连接·····	(126)
四、环向连接·····	(127)
五、变形缝·····	(128)
第六节 衬砌防水·····	(131)

一、管片及砌块的自身防水与制作精度	(132)
二、接头面的密封	(135)
三、灌注密封剂	(144)
四、嵌缝填料	(145)
五、螺栓孔防水	(147)
六、二次衬砌防水	(149)
七、竖井与隧道连接处的防水	(150)
八、其它防水措施	(150)
第四章 衬砌设计	(152)
第一节 设计内容和方法	(152)
一、设计内容	(152)
二、设计原则	(154)
三、设计模型	(155)
四、计算理论	(159)
五、柔性衬砌	(164)
六、设计方法	(166)
第二节 荷 载	(167)
一、荷载类型	(167)
二、土压力分布规律	(170)
三、太沙基的土压力理论	(172)
四、饱和软土地层荷载简图	(176)
五、上海盾构隧道地层压力实测资料	(180)
第三节 自由变形法	(183)
一、整体匀质自由变形圆环计算	(183)
二、带有拉杆的圆环计算	(187)
第四节 弹性抗力法	(195)
一、日本的三角形分布法	(195)
二、苏联O.E.布加也娃法(朱氏法)	(197)

第五节 椭圆变形法	(207)
一、计算图式	(207)
二、应力场和位移场	(208)
三、内力公式	(224)
四、考虑接头变形影响的位移与内力 公式	(232)
五、成果分析	(240)
第六节 弹性铰法	(243)
一、计算图式	(243)
二、接头刚度	(245)
三、自由变形圆环内力位移公式	(251)
四、考虑抗力的内力及位移公式	(280)
第七节 收敛限制法	(303)
一、衬砌变形	(304)
二、内力公式	(308)
三、收敛量测	(308)
第八节 断面设计	(310)
一、管片断面	(310)
二、接缝断面	(317)
三、管片构造	(325)
第五章 地层移动的预测和对策	(329)
第一节 地面沉降的预测	(329)
一、地面沉降的原因	(329)
二、地面沉降的预测	(333)
三、地面沉降的发展规律和特征	(350)
第二节 隧道的纵向沉降	(369)
一、隧道不均匀沉降的原因	(370)
二、隧道衬砌环入土后的沉降	(375)

三、	施工阶段隧道的不均匀沉降	(383)
四、	隧道在长期运用中的沉降	(389)
第三节	地面环境保护	(395)
一、	根据地质和环境条件采用适当的环境 保护方法	(395)
二、	积极保护法中的土工工作	(398)
三、	保护工程法中的土工工作	(413)
附	表	(419)

第一章 绪 论

第一节 盾构法隧道概述

一、盾构法基本概念

盾构法是在地面下暗挖隧道的一种施工方法。当代城市建筑、公用设施和各种交通日益繁杂，市区明挖隧道施工，对城市生活的干扰问题日趋严重，特别在市区中心遇到隧道埋深较大，地质复杂的情况，若用明挖法建造隧道则很难实现。在这种条件下采用盾构法对城市地下铁道、上下水道、电力通讯、市政公用设施等各种隧道建设具有明显优点。此外，在建造穿越水域、沼泽地和山地的公路和铁路隧道或水工隧道中，盾构法也往往因它在特定条件下的经济合理性而得到采用。

盾构法施工的概貌如图 1—1 所示。构成盾构法的主要内容是：先在隧道某段的一端建造竖井或基坑，以供盾构安装就位。盾构从竖井或基坑的墙壁开孔处出发，在地层中沿着设计轴线，向另一竖井或基坑的设计孔洞推进。盾构推进中所受到的地层阻力，通过盾构千斤顶传至盾构尾部已拼装的预制隧道衬砌结构，再传到竖井或基坑的后靠壁上。盾构是这种施工方法中最主要的独特的施工机具。它是一个能支承地层压力而又能在地层中推进的圆形或矩形或马蹄形等特殊形状的钢筒结构，在钢筒的前面设置各种类型的支撑和开挖土体的装置，在钢筒中段周圈内面安装顶进所需的千斤顶，钢筒尾部是具有一定空间的壳体，在盾尾内可以拼装一

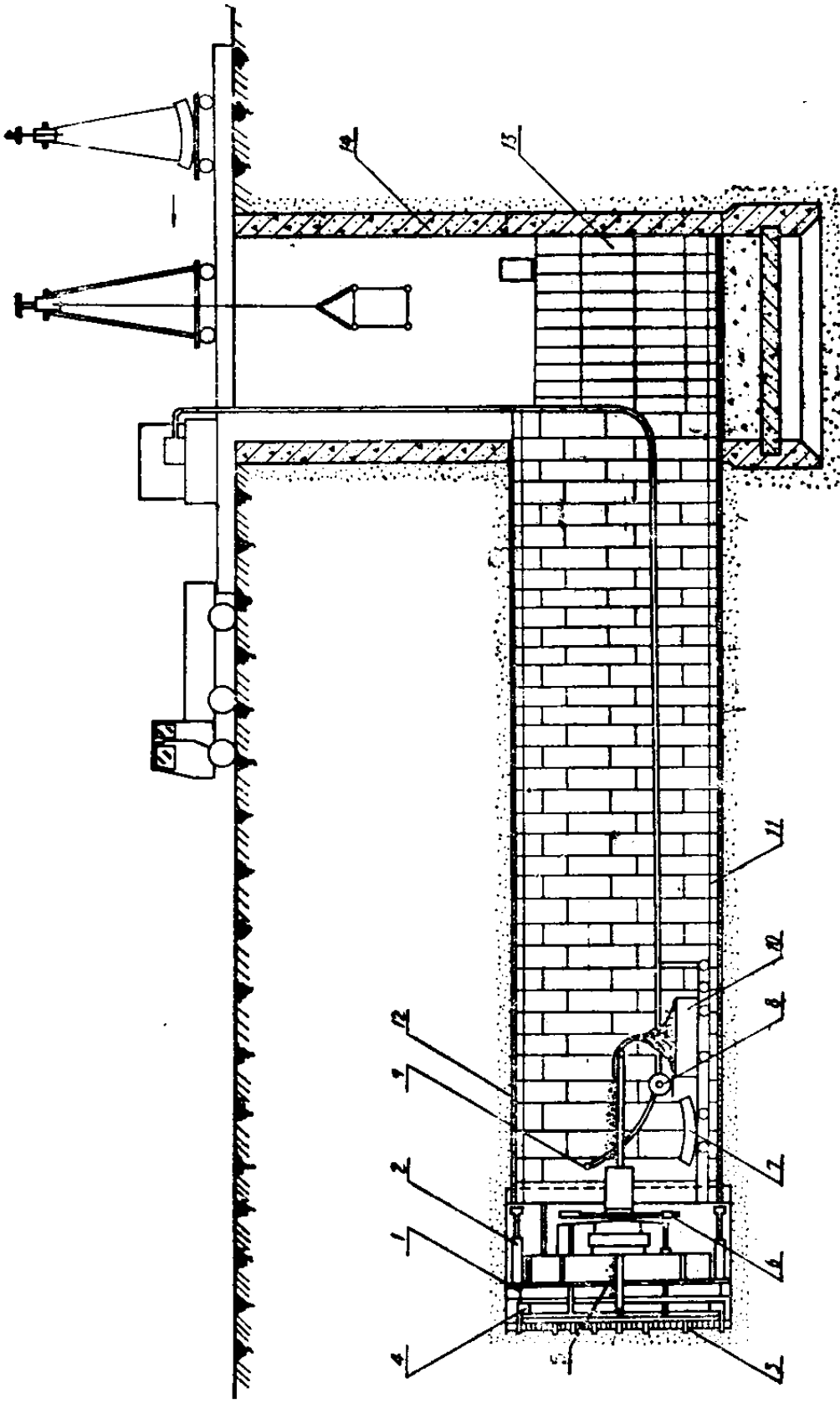


图 1—1 盾构法施工概貌

1—盾构；2—盾构千斤顶；3—盾构正面网格；4—出土转盘；5—出土皮带运输机；6—管片拼装机；7—管片；8—压浆泵；9—压浆孔；10—出土机；11—由管片组成的隧道衬砌结构；12—在盾尾空隙中的压浆；13—后盾管片；14—竖井。

至二环预制的隧道衬砌环。盾构每推进一环距离，就在盾尾支护下拼装一环衬砌，并及时向紧靠盾尾后面的开挖坑道周边与衬砌环外周之间的空隙中压注足够的浆体，以防止隧道及地面下沉。在盾构推进过程中不断从开挖面排出适量的土方。

使用盾构法，往往需要根据穿越土层的工程水文地质特点辅以其他施工技术措施。主要有：

1. 疏干掘进土层中地下水的措施；
2. 稳定地层、防止隧道及地面沉陷的土壤加固措施；
3. 隧道衬砌的防水堵漏技术；
4. 配合施工的监测技术；
5. 气压施工中的劳动防护措施；
6. 开挖土方的运输及处理方法等。

二、盾构法的主要优点

1. 除竖井施工外，施工作业均在地下进行，既不影响地面交通，又可减少对附近居民的噪音和振动影响；
2. 盾构推进、出土、拼装衬砌等主要工序循环进行，施工易于管理，施工人员也较少；
3. 土方量较少；
4. 穿越河道时不影响航运；
5. 施工不受风雨等气候条件影响；
6. 在土质差水位高的地方建设埋深较大的隧道，盾构法有较高的技术经济优越性。

三、盾构法存在的主要问题

1. 当隧道曲线半径过小时，施工较为困难；
2. 在陆地建造隧道时，如隧道覆土太浅，则盾构法施

工困难很大，而在水下时，如覆土太浅则盾构法施工不够安全；

3. 盾构施工中采用全气压方法以疏干和稳定地层时，对劳动保护要求较高，施工条件差；

4. 盾构法隧道上方一定范围内的地表沉陷尚难完全防止，特别在饱和含水松软的土层中，要采取严密的技术措施才能把沉陷限制在很小的限度内；

5. 在饱和含水地层中，盾构法施工所用的拼装衬砌，对达到整体结构防水性的技术要求较高。

第二节 盾构法隧道的发展历史

一、国外盾构法隧道的发展历史

盾构法问世已160多年。最早发明盾构法的思路是来自发明者的一个有趣的发现，他发现船的木板中，有一种蛀虫钻出孔道，并用它自己分泌的液体覆涂在孔壁上。1818年英国的布鲁诺（M.I. Brunel）在蛀虫钻孔的启示下，最早提出了用盾构法建设隧道的方法。1825年，他第一次在伦敦泰晤士河下用一个断面高6.8m、宽11.4m的矩形盾构修建了一条隧道。由于初始未能掌握抵制泥水涌入隧道的方法，隧道施工中两次被淹，后来在东伦敦地下铁道公司的合作下，经过对盾构施工的改进，用气压辅助施工，才于1843年完成了全长458m的第一条盾构法隧道。1865年巴尔劳（B.W. Barlow）首次采用圆形盾构，并用铸铁管片作为初次隧道衬砌。1869年，他用圆形盾构在泰晤士河底下建成了外径为2.21m的隧道。在盾构穿越饱和含水地层时，施加压缩空气以防止涌水的“气压法”最先是在1830年由劳德口切兰斯（Lord Cochrane）发明的。1874年，在英国伦敦地下铁

道南线的粘土和含水砂砾地层中建造内径为3.12m的隧道时，格雷塞德 (Jams Henry Greathead) (1844—1896) 综合了以往所有盾构施工和气压法的技术特点，较完整地提出了气压盾构法的施工工艺，并且首创了在盾尾后面的衬砌外围环形空隙中压浆的施工方法，为盾构法发展起了重大推动作用。1880—1890年间，在美国和加拿大间的圣克莱河下用盾构法建成一条直径6.4m，长1800余米的水底铁路隧道。二十世纪初，盾构施工法已在美、英、德、苏、法等国开始推广。30~40年代在这些国家已成功地使用盾构建造成内径自3.0~9.5m的多条地下铁道及过河公路隧道。仅在美国纽约就采用气压法建成了19条重要的水底隧道。盾构施工的范围很广泛，有公路隧道、地下铁道、上下水道以及其他市政公用设施管道等。苏联40年代初开始用直径为6.0~9.5m的盾构先后在莫斯科、列宁格勒等市修建地下铁道的区间隧道及车站。从20世纪60年代起，盾构法在日本得到迅速发展，除了大量用在东京、大阪、名古屋等城市的地下铁道建设中外，更多地是用于下水道等市政公用设施管道建设中。70年代，日本及联邦德国等国针对在城市建设区的松软含水地层中由于盾构施工所引起的地表沉陷、预制高精度钢筋混凝土衬砌和接缝防水等技术问题，研制了各种新型的衬砌和防水技术及局部气压式、泥水加压式和土压平衡式等新型盾构及相应的工艺和配套设备。

目前，世界上仍有工程采用手掘式盾构，如图1—2所示。按不同的地质条件，开挖面可全部敞开人工开挖；也可用全部或部分的正面支撑，根据开挖面土体自立性适当分层开挖，随挖土随支撑。开挖土方量为全部隧道排土量。这种盾构便于观察地层和清除障碍，易于纠偏，简易价廉，但劳动强度大，效率低，如遇正面坍方，易危及人身及工程安

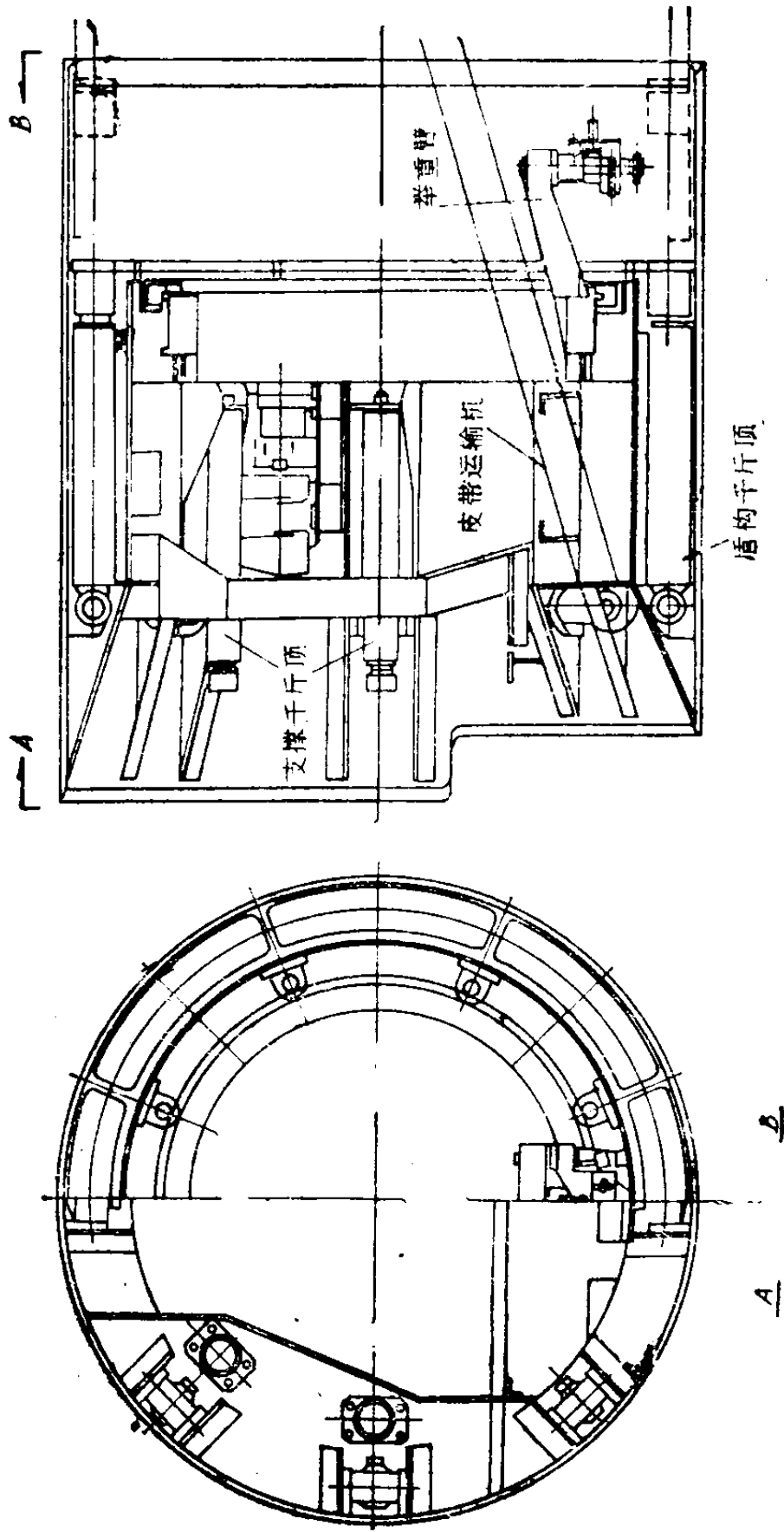


图 1—2 手掘式盾构

全。在含水地层中需辅以降水、气压或土壤加固。

挤压式盾构是将手掘式盾构胸板封闭，以挡住正面土体。这种盾构分为全挤压式或局部挤压式两种，它适用于软弱粘性土层。盾构全挤压向前推进时，封闭全部胸板，不需出土，但要引起相当大的地表变形。当采用局部挤压式盾构，要部分打开胸板，将需要排出的土体从开口处挤入盾构内，然后装车外运，这种盾构施工，地表变形也较大。

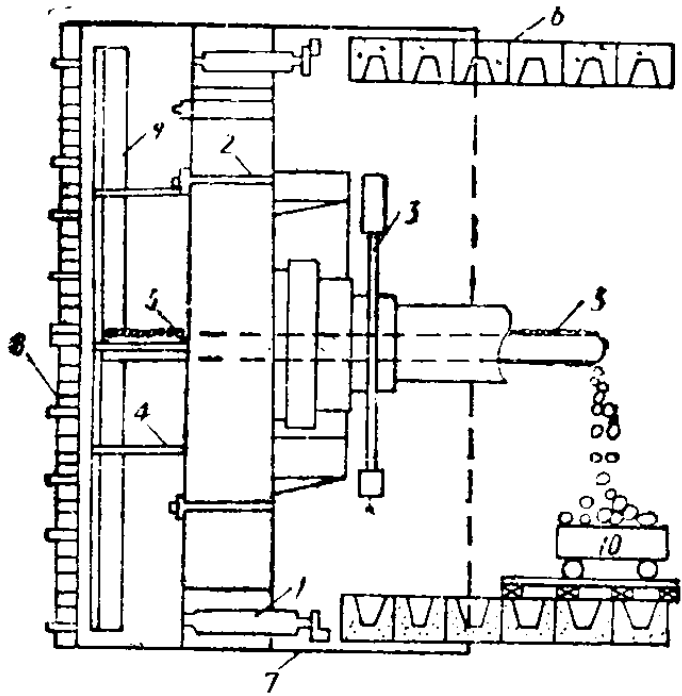


图 1—8 网格式盾构

1——盾构千斤顶（推进盾构用）；2——开挖面支撑千斤顶；3——举重臂（拼装装配式钢筋混凝土衬砌用）；4——堆土平台（盾构下部土块由转盘提升后落入堆土平台）；5——刮板运输机，土块由堆土平台进入后输出；6——装配式钢筋混凝土衬砌；7——盾构钢壳；8——开挖面钢网格；9——转盘；10——装土车。

网格式盾构，在上海软土层中常常被采用。它具有一定特点，进土量接近或等于全部隧道排土量，且往往带有局部挤压性质，盾构正面装钢板网格，在推进中可以切土，而在停止推进时可起稳定开挖面的作用。切入的土体可用转盘、皮带运输机、矿车或水力机械运出，如图 1—3 所示。这种

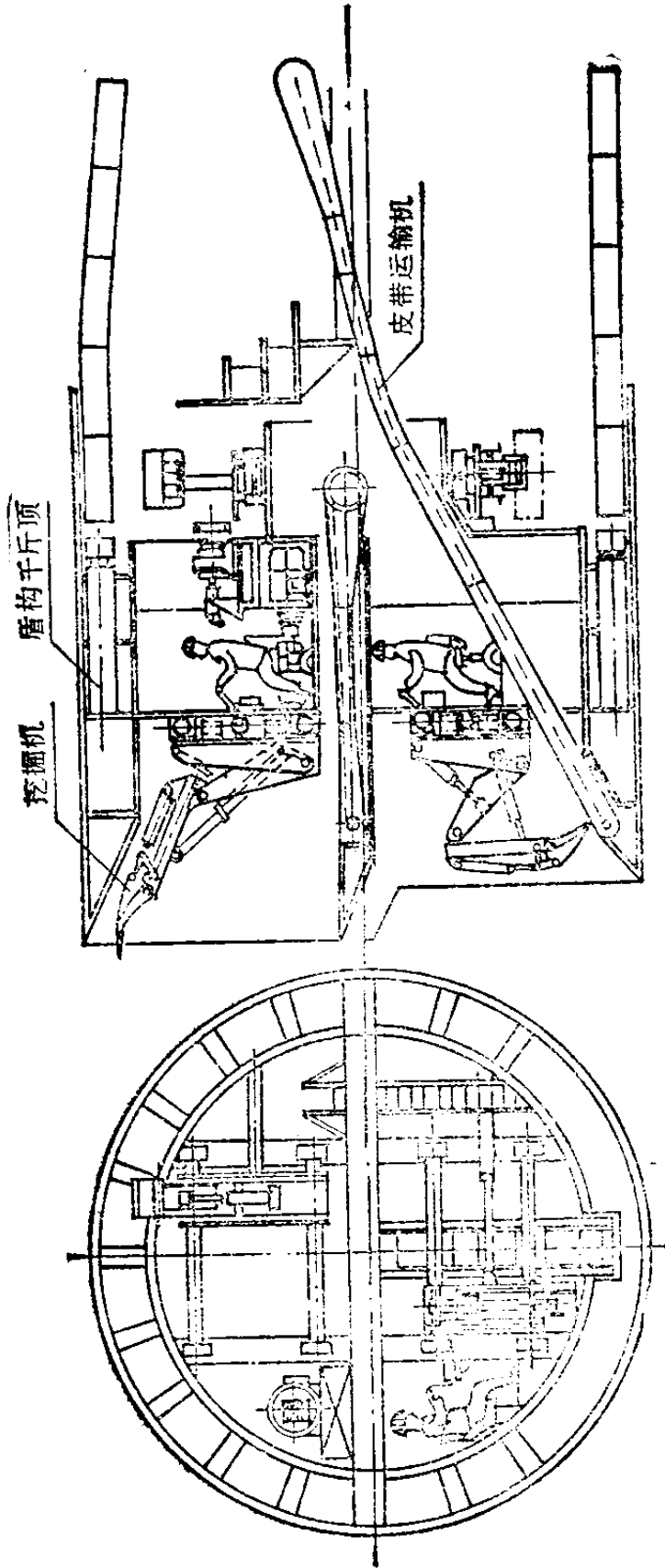


图 1—4 半机械式盾构

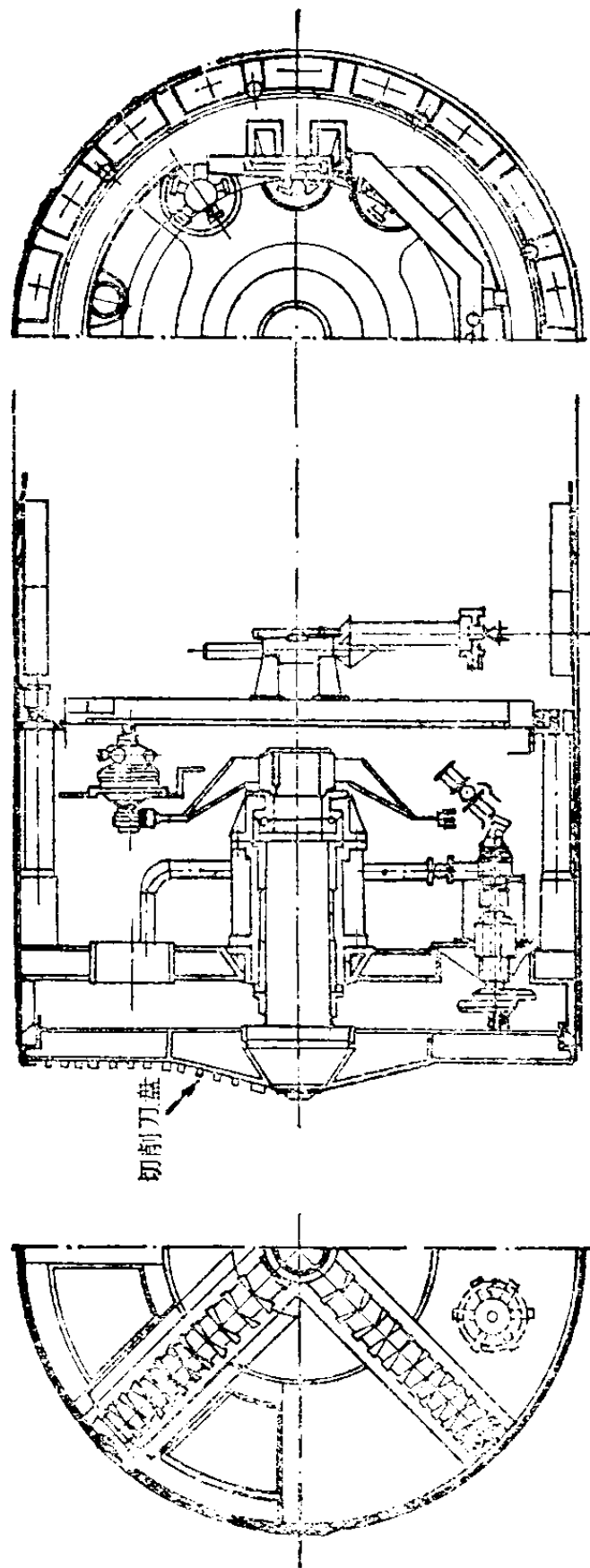


图 1—5 开胸机械切割盾构