

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2013.02.023

盾构法施工在西安地铁建设中的应用

王鸣晓 杨晓强 温克兵
(西安市地下铁道有限责任公司 西安 710018)

摘 要 论述盾构法施工的优点以及盾构法在城市地铁建设中的应用。对西安地铁2号线和1号线的盾构施工所穿越的地层情况、投入的盾构机类型、数量和技术参数、施工进度及过站方式等进行总结和分析,为以后西安地区地铁建设过程中盾构机的选型、改造、盾构施工计划合理编制等方面提供参考依据。

关键词 城市轨道交通;盾构法;地层状况;技术参数;施工进度

中图分类号 U455.4 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2013)02-0088-06

1 西安地铁盾构施工概况

盾构法施工具有对周围环境影响小、自动化程度高、施工速度快、优质高效以及安全环保等优点,在充分考虑盾构施工技术优势以及综合考量工程地质与水文地质、城市环境、地面交通状况和建设工期等影响的条件下,盾构法施工在城市地铁发展及其他地下空间利用方面,越来越受到重视和青睐。

西安地铁2号线一期工程(北客站—会展中心段)已经建成通车运营,2号线南段工程(会展中心—韦曲南站段)正在建设,计划于2014年6月通车试运营;1号线主体工程基本完成,计划于2013年9月通车试运营。在这纵贯城市南北、横穿东西方向的两条线路施工过程中,充分采用了盾构施工技术(见表1)。在正在开工建设的3号线以及以后陆续开工建设的各条线路中,盾构法在区间隧道的施工应用仍然会占到很大的比例。

2 盾构隧道所穿越的地层情况

西安市位于渭河冲积平原—关中平原的中部,其

收稿日期:2012-09-05 修回日期:2012-10-10

作者简介:王鸣晓,男,高级工程师,从事城市轨道交通规划、设计和施工技术研究。

表1 西安地铁2号线、1号线区间隧道盾构工法统计

线路名称		线路长及盾构比例	区间线路总长/m	盾构隧道总长/m	盾构法所占比例/%	区间数量	备注
2号线	左线		22 018.99	13 655.7	62.02	13	含2号线南段工程
	右线		21 958.04	13 600.26	61.94	13	
1号线	左线		21 201.77	16 994.05	80.15	15	
	右线		21 384.82	16 985.3	79.43	15	

(Q₃)和中更新统(Q₂)地层,以湖积、洪积、冲积、冲洪积、风积为主,岩性多为砂层、卵石、砂砾石层、粉质黏土、粉土及黄土。西安地铁2号线、1号线先后穿越了西安市内几乎所有地层及部分特殊地层,为控制地表沉降,其施工过程的出土量、同步注浆等情况也各不相同(见表2)。

3 西安地铁建设投入情况

西安地铁2号线、1号线工程建设共投入16台盾构机,均为土压平衡盾构机,其中2号线一期工程建设投入的8台盾构机为日本小松盾构机,在2号线一期工程盾构隧道施工完成后,这8台盾构机继续转入1号线及2号线南段的工程建设,并引入了美国罗宾斯、中铁中隧、中铁轨道和日本川崎等8台盾构机,投入使用的盾构机数量、类型及掘进里程等具体情况见表3。

4 西安地铁盾构主要技术参数

盾构机是根据工程地质、水文地质、地面建筑物及地下管线等具体特征“量身定做”的产物,盾构机的选型决定着盾构施工的成败,因此,盾构机选型应以工程地质、水文地质为主要依据,综合考虑周围环境条件、隧道断面尺寸、施工长度、线路曲率半径、地貌、地面建筑物等环境条件,参考国内外工程实例及相关技术规范、施工规范、标准等,对盾构机类型、驱动方式、功能要求以及主要技术参数等进行研究确定。

表 2 西安地铁 2 号线、1 号线盾构隧道所穿越主要地层情况及地表沉降控制

线路	盾构区间	盾构区间长度 (左线)/m	穿越地层及其概况	隧道覆土 厚度/m	出土量 /(m ³ /环)	同步注浆量 /(m ³ /环)	地表沉降 值/mm
2 号 线 一 期	北客站— 北苑站	1 239.10	隧道主要穿越地层为<2-4>粉细砂层、<2-5>中砂层、<2-6>粗砂层、<2-7>砾砂层,中砂比例最大,超过 44%,平均标贯击数 101 击	8.12~15.16	46~50	3.8~4.2	-5.63~-26.57
	行政中心站— 凤城五路站	1 046.10	隧道主要穿越地层为<3-1-2>新黄土层、<3-2>古土壤层,局部含少量<3-5-1>粉质黏土层	7.99~11.58	44~46	3.0~3.5	+0.4~-19.32
	北大街站— 钟楼站	841.10	隧道主要穿越地层为<4-1>老黄土、<4-4>粉质黏土、<3-2-2>古土壤、<3-1>新黄土,部分见<4-5>粉土及<4-7>中砂夹层	9.8~17.7	42~45	4.2~7.0	-0.74~-28.81
	小寨站— 纬一街站	774.55	隧道穿越地层主要为<3-2-2>古土壤、<4-1-2>老黄土、<4-4>粉质黏土,局部含<4-6>细砂层,本区间通过 F8 地裂缝,采用浅埋暗挖法施工后盾构空推通过	8.92~12.2	44~46	3.2~4.2	-2.16~-22.09
2 号 线 南 段	凤栖原站— 航天城站	1 069.60	隧道穿越地层主要为<2-2>粉质黏土、<2-1>黄土状土,局部见<2-6>粗砂夹层;穿越 Fc3 地貌分界线后,穿越<4-2-2>古土壤层、<4-1-3>老黄土地层	5.6~13.96	42~46	3.2~3.7	-4.56~-28.49
	航天城站— 韦曲南站	1 565.50	隧道穿越地层主要为<2-2>粉质黏土、<4-2-1>古土壤层、<4-1-4>老黄土、<2-6>粗砂、<2-2>粉质黏土和<2-9>卵石地层	7.71~14.07	42~46	3.6~5.2	-1.41~-22.36
1 号 线	三桥站—皂河站	1 762.30	隧道穿越地层主要为<2-5-1>中砂层和<2-1>黄土状土层,局部断面见<2-4>细砂层。	9.39~20.64	48~52	6.2~7.5	-3.14~-31.12
	玉祥门站— 洒金桥站	1 059.60	隧道穿越地层主要为<3-2>古土壤、<3-4>粉质黏土,部分断面拱顶穿越<3-1-3>饱和新黄土,局部见<3-5>粉土和<3-6>粗砂透镜体及<3-7>中砂夹层;在本区间距玉祥门站 670 m 穿越地貌单元分界线后,穿越<4-4>粉土和<4-1>老黄土地层	9.62~17.29	42~45	3.3~3.8	-1.26~-22.63
	万寿路站— 长乐坡站	1 171.00	本区间地质条件复杂,隧道主要穿越地层为<4-1-1>老黄土、<4-8>粗砂、<4-10>圆砾土、<4-11>卵石和<4-4>粉质黏土地层,局部见<4-7>中砂透镜体;在距万寿路站 1 060 m 左右穿越地貌单元分界线后,穿越地层主要为<2-6>粗砂、<2-8>圆砾土地层,局部见<2-7>砾砂和<2-9>卵石土地层,本区间通过 F5 地裂缝,采用浅埋暗挖法施工后盾构空推通过	10.44~20.08	48~54	4.5~6.1	-3.2~-29.6
	半坡站— 纺织城站	859.00	隧道主要穿越地层为<4-2>古土壤、<4-4>粉质黏土,局部穿越<4-8>粗砂和<4-11>卵石透镜体,在靠近纺织城端穿越<4-8>粗砂地层,本区间通过 F6 地裂缝,采用浅埋暗挖法施工后盾构空推通过	8.44~28.27	56~57	3.1~4.3	-2.6~-20.7

西安地铁 2 号线一期工程,尤其是行政中心—会展中心段,工程地质为复合黄土地层或全断面砂层,盾构主要穿越老黄土、古土壤及粉质黏土层,部分地

段含砂层透镜体,因此盾构机选型及主要技术参数基本相同。随着 2 号线南段工程的展开和 1 号线工程建设的推进,地铁隧道穿越地层的地质情况也愈加复

表 3 西安地铁 2 号线、1 号线建设投入的盾构机数量、类型及掘进里程

线路	盾构区间	设备类型	数量	隧道长度/m	备注 1	备注 2
2 号线一期	行政中心—凤城五路	日本小松 TM614pmx 土压平衡盾构机	1	1 046.0	左线	
				1 046.0	右线	
	北客站—北苑—运动公园—行政中心	日本小松 TM614pmx 土压平衡盾构机	2	3 009.0	左线	原行政中心—凤五区间盾构机
				3 004.5	右线	
	大明宫西—龙首原—安远门—北大街	日本小松 TM614pmx 土压平衡盾构机	2	2 959.0	左线	
				3 019.5	右线	
	北大街—钟楼—永宁门	日本小松 TM614pmx 土压平衡盾构机	2	2 077.6	左线	
				2 082.1	右线	
	小寨—纬一街—会展中心	日本小松 TM614pmx 土压平衡盾构机	2	2 013.9	左线	
				2 019.6	右线	
2 号线南段	凤栖原—航天城—韦曲南站	日本小松 TM614pmx 土压平衡盾构机	2	2 429.2	右线	原北大街—永宁门盾构机
				2 556.6	左线	
1 号线	后围寨—三桥—皂河(左线)+皂河—三皂区间风井(右线)	中铁装备 ZTE6250 型土压平衡盾构机	2	4 537.9		
	后围寨—三桥—三皂区间风井(右线)	中铁隧道 CTE6250 型土压平衡盾构机	1	2 383.5		
	皂河—枣园—汉城路	杭锅/川崎 6260 土压平衡盾构机	2	1 858.5	左线	
				1 613.4	右线	
	汉城路—开远门—劳动路	日本小松 TM614pmx 土压平衡盾构机	2	3 069.6	左线	原北客站—行政中心盾构机
				3 072.7	右线	
	玉祥门—洒金桥	日本小松 TM614pmx 土压平衡盾构机	1	1 059.6	左线	原小寨—会展中心标盾构机
				1 059.6	右线	
	北大街—五路口—朝阳门	日本小松 TM614pmx 土压平衡盾构机	1	2 030.2	右线	原小寨—会展中心盾构机
		中铁装备 CTE6250 型土压平衡盾构机	1	2 035.4	左线	
	康复路—通化门—万寿路—长乐坡	罗宾斯辐条式土压平衡 DIA6150 盾构机	2	3 445.9	左线	
				3 346.1	右线	
	纺织城—半坡—浐河—长乐坡	日本小松 TM614pmx 土压平衡盾构机	2	2 210.3	左线	原大明宫西—北大街盾构机
				2 261.4	右线	

杂,特别是全断面沉积砂层和全断面砂卵石等地层(具体穿越地层情况参考表 2),对盾构机的功能提出新的要求。为适应地质条件的变化,在总结 2 号线一期工程盾构施工的基础上,原来在 2 号线一期工程中掘进的 8 台盾构机,重新进行了维修和改造,1 号线新引进的 8 台盾构机在盾构机选型和设计联络阶段,对设备性能进行了深入的研究和论证,技术参数也进行了适当调整。西安地铁盾构主要技术参数见表 4。

5 西安地铁盾构施工进度

5.1 西安地铁盾构施工平均进度

城市轨道交通地下隧道在施工阶段划分标段大部

分采用盾构法施工,是充分利用了盾构法施工的诸多优点,而在盾构施工工期安排方面,计划进度是影响工期安排的关键因素,计划编制的依据来源多样。因此,在本文中通过总结西安地铁的施工进度,拟采用平均掘进速度,即以盾构始发至该盾构完成其全部区间掘进任务全过程的平均日进度作为其平均进度(见表 5),反映西安地区施工进度情况。

在表 5 中,有两点需要作出说明的是:

- 1) 西安地铁使用的每环管片宽度为 1.5 m,在日常的现场作业中,以环作为进度单位,因此,在表 5 中仍以环/d 作为平均进度单位。
- 2) 行政中心—凤城五路站区间和玉祥门—洒金桥

表 4 西安地铁盾构主要技术参数

序号	系统名称	内容	盾构机 1	盾构机 3	盾构机 4	盾构机 7	盾构机 8	盾构机 9
			技术参数	技术参数	技术参数	技术参数	技术参数	技术参数
1	主机	直径/mm	6 160	6 250	6 270	6 160	6 150	6 160
		盾体长度/mm	8 680	7 953	8 550	8 680	11 100	8 680
		总长/m	74. 38	80	52	74. 38	75. 5	74. 38
		总重/t	323	500		323	450	323
2	刀盘	刀盘形式	面板式	辐条式	辐条式	面板式	辐条式	面板式
		开口率/%	43	60	52	43	65	43
3	刀盘驱动	驱动类型	变频电驱	变频电驱	变频电驱	变频电驱	变频电驱	变频电驱
		驱动功率/kW	440	660	800	440	750	440
		额定扭矩/kNm	5 147	5 500	5 040	5 147	5 128	5 147
		脱困扭矩/kNm	6 176	6 900	6 048/7 560	6 176	6 154	6 176
4	主切刀	切刀数量/把	76	62	90			
		切刀伸出量/mm	80	110	105	76	62	76
	先行刀	数量/把	51	39 + 2	56	80	100	80
		伸出量/mm	110	145/220	155	97	41	51
	中心刀	中心刀数量/把	1	1	13	110	150	110
	超挖刀	超挖刀数量/把	2		2	1	1	1
	保径刀	焊接撕裂刀/把		6		2	1	2
5	主轴承	主轴承直径/mm	2 000	3 000	2 745	2 000		2 000
6	推进系统	油缸总推力/kN	38 500	37 000	40 000	38 500	36 000	38 500
7	铰接系统	铰接类型	主动型	被动型	被动型	主动型	主动型	主动型
8	螺旋输送机	螺旋轴形式	轴式	轴式	轴式	轴式	轴式	轴式
		驱动形式	液压驱动	电机驱动	液压驱动	液压驱动	液压驱动	液压驱动
		安装功率/kW	45 + 90	200	225	150	150	45 + 90
		输送能力/(m ³ /h)	304	300		280	233	
		轴伸缩行程/mm	0	800	0	1 000	500	0
9	加泥系统	膨润土箱容积/m ³	4	6	6		6	4
10	装机功率	总装机功率/kW	927. 7	1 259. 15	1 342	987. 2	1 500	927. 7

注：盾构机 1 为用于 2 号线一期工程北客站—会展中心站盾构区间隧道施工的日本小松盾构机,8 台设备主要参数相同；
盾构机 3 为用于 1 号线后围寨—三桥—三皂区间风井(右线)的中铁隧道 CTE6250 型土压平衡盾构机；
盾构机 4 为用于 1 号线皂河—枣园—汉城路区间的杭锅/川崎 6260 土压平衡盾构机；
盾构机 7 为用于 1 号线北大街—五路口—朝阳门区间(右线)的日本小松盾构机；
盾构机 8 为用于 1 号线康复路—通化门—万寿路—长乐坡区间的美国罗宾斯辐条式土压平衡 DIA6150 盾构机；
盾构机 9 为用于 1 号线纺织城—半坡—浐河—长乐坡区间的日本小松盾构机。

站区间均为单区间,左右线由一台盾构完成,即一条隧道贯通后,盾构机解体吊出转场至始发井进行二次始发,进行另一条隧道的掘进。行政中心—凤城五路站区间先进行右线施工,平均进度 5.3 环/d,而进行左线施工时则达到 11.4 环/d,曾创下日掘进 27 环(40.5 m)和月掘进 485 环(727.5 m)的盾构掘进全国

最高纪录;玉祥门—洒金桥站区间先进行左线施工,平均进度5.3 环/d,在右线则是 7.9 环/d。在几乎相同的地质条件下进行二次掘进,第二条隧道的进度远远高于第一条隧道。由于左右线均由一台设备完成,若考虑盾构机转场和二次始发的因素,这两台盾构机的平均掘进速度分别为 6.3 环/d 和 5.7 环/d。

表 5 西安地铁盾构施工平均进度

线路	序号	区间	隧道长度/m	隧道环数	历时/d	平均进度/(环/d)	备注
2 号 线 一 期	1	行政中心—凤城五路	1 046	698	61	6.3	左线
			1 046	698	132		右线
	2	北客站—北苑—运动公园—行政中心	3 009	2 006	460	4.4	左线
			3 004.5	2 003	473	4.2	右线
	3	大明宫西—龙首原—安远门—北大街	2 959	1 973	390	5.1	左线
			3 019.5	2 022	383	5.3	右线
	4	北大街—钟楼—永宁门	2 077.6	1 385	302	4.6	左线
			2 082.1	1 389	326	4.3	右线
	5	小寨—纬一街—会展中心	2 006	1 337	280	4.8	左线
			2 019	1 346	238	5.7	右线
1 号 线	6	后围寨—三桥—三皂区间风井	2 383.5	1 702	429	4.0	左线
			2 631.9	1 743	447	3.9	右线
	7	皂河—枣园—汉城路	1 858.5	1 232	316	3.9	左线
			1 613.4	1 075	286	3.8	右线
	8	汉城路—开远门—劳动路	3 069.6	2 047	369	5.5	左线
			3 072.7	2 042	360	5.7	右线
	9	玉祥门—洒金桥	1 059.6	706	132	5.7	左线
			1 059.6	706	89		右线
	10	北大街—五路口—朝阳门	2 030.2	1 357	318	4.3	右线
			2 035.4	1 354	307	4.4	左线
	11	康复路—通化门—万寿路—长乐坡	3 445.9	2 299	529	4.4	左线
			3 346.1	2 227	495	4.5	右线
	12	纺织城—半坡—浐河—长乐坡	2 210.3	1 505	472	3.2	左线
			2 261.4	1 492	532	2.8	右线

5.2 影响盾构施工平均进度的因素分析

影响盾构施工进度的因素很多,与盾构机选型、工程地质水文地质条件、盾构施工管理水平、盾构过站(推拉)或转场等因素密切相关。

盾构机选型的正确与否决定着盾构施工的成败。从西安地铁2号线一期工程 and 1号线工程建设来看,在西安地区选用土压平衡盾构机是合适的选择。尽管从理论上说,盾构机是主要依据工程地质水文地质“量身定做”的设备,但工程地质水文地质条件的复杂程度直接影响盾构施工的进度、质量和安全;盾构施工管理水平的高低是影响盾构掘进的重要因素,盾构机是一种集机、电、液、传感与信息技术于一体的隧道掘进专用工程机械,在施工过程中对盾构机的维护、维修和保养是实现顺利施工的保障,而保证盾构施工顺利进行的各种物资储备和辅助材料的供应与周转等体现着施

工单位的管理水平;盾构施工过程中过站或者转场所利用的时间也影响着盾构掘进平均进度。

另外,施工过程中事故的处理时间也是影响进度的非正常因素之一,在西安地铁盾构施工过程中,未发生过较大事故,因此,西安地铁盾构施工的平均进度未考虑事故的因素。

6 盾构法在西安地铁1、2号线应用分析

盾构法施工在2号线一期工程的基础上,积累了宝贵的经验,对于1号线及2号线南段盾构施工起到了积极的指导作用。但相比于2号线一期工程,1号线的地质情况更加复杂,尤其是全断面砂卵石地层的掘进施工对设备的性能要求更高;另外,盾构吊出转场等过站方式也在1号线得到了进一步的应用。

6.1 土压平衡盾构机在全断面砂卵石地层的掘进

全断面砂层在2号线一期工程北客站—运动公园

区间出现过,但当时受制于设备的性能等因素,在施工过程中留下了较为深刻的教训,根据详细的地质勘察资料,1号线的地质情况更加复杂,尤其在后围寨—三桥区间以及万寿路—长乐坡区间等,对盾构机的选型及推力、扭矩、刀盘开口率、刀具配置、刀盘驱动功率等提出更高的要求。

在1号线盾构施工过程中,在康复路—通化门—万寿路—长乐坡区间施工的罗宾斯盾构机可以作为成功选型的代表(具体参数见表4),其较大的驱动功率和推力,配备较大开口率的刀盘,在合适的辅助工法配合下,顺利完成了全断面砂卵石地层中的掘进任务。

通过2号线和1号线全断面砂层掘进的经验总结说明,盾构机在该地层情况下的选型趋于成熟,从设备方面来说,选用动力参数较强的设备应配备适应性较强的刀盘。动力参数不仅包括刀盘的驱动功率和盾构机推力,还应包括螺旋机的驱动功率;根据1号线的施工经验,开口率大一点的刀盘更能适应西安地区砂卵石地层掘进。

从辅助工法来看,通过充分的渣土改良能够保证盾构施工的顺利进行;在施工工艺方面,在土压平衡模式下快速掘进,同时加强同步注浆和多次补浆,能够满足盾构施工的质量和安

6.2 盾构吊出转场的过站方式在1号线的应用

与2号线盾构施工站内过站方式不同,在1号线的万寿路站、枣园站,根据地面建(构)筑物等边界条件及交通状况,采用盾构吊出转场的过站方式,即在车站两端分别预留盾构吊出井和始发井,待盾构出洞后吊出,转场至车站另一端的始发井,吊入后重新组装二次始发。

根据1号线的施工经验,无论采用弧形导台或钢轨导引等站内过站还是吊出转场过站,其所利用的时间相差不多,一般都在20~30d。但是,这两种过站方式对车站施工和道路交通疏导的影响程度差异较大,采用站内过站,车站的净空、净高必须满足盾构过站的要求,并且车站的站台板、轨顶风道等内部结构施工必须待盾构过站,甚至盾构隧道施工完成后才能进行,延长了车站的施工时间,增加了车站施工成本,然而对道路的恢复非常有利,在城市地面交通日渐拥堵的情况下,提早恢复道路对缓解交通拥堵难能可贵。采用盾构吊出转场的过站方式,对车站结构的施工影响相对较小,但由于预留洞口存在,对恢复道路交通极为不利,并且在盾构机吊出一转场—吊入的过程中,仍然要占用大量的道路资源。

因此,在盾构过站方式的选择上,应在充分研究该车站站点地理环境位置、交通状况等因素的基础上,结

合车站结构设计情况,选用合适的过站方式。

7 结语

随着盾构施工技术的发展与成熟,盾构法的优越性更加明显,根据2号线一期工程及1号线的施工经验,认真研究地质条件,合理的盾构机选型及主要技术参数的确定是保证盾构顺利施工的关键。鉴于西安地质条件的复杂性,选用动力参数较强的设备并配备适应性较强的刀盘,通过试验选用合适的辅助工法,是盾构施工顺利进行的基础保障。

盾构施工的基本原则是计划生产,均衡掘进,从大局角度选用合适的进度参数进行计划安排,才能做出合理的建设工期安排。

盾构施工应综合车站施工、城市环境、交通状况等因素,充分研究,多方论证,减小盾构施工对社会环境的影响,真正发挥盾构法施工的优越性。

参考文献

- [1] 陈馈,洪开荣,吴学松.盾构施工技术[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [2] [日]地盘工学会.盾构法的调查·设计·施工[M].牛青山,译.北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [3] 西安市地下铁道有限责任公司.西安市轨道交通二号线施工图设计文件[G].西安,2007.
- [4] 西安市地下铁道有限责任公司.西安市轨道交通一号线施工图设计文件[G].西安,2009.
- [5] 杨晓强,温克兵.土压平衡盾构机在全断面砂卵石地层中的应用[J].工程机械与维修,2011:132-135.

(编辑:郝京红)

Application of Shield Tunneling in Xi'an Metro

Wang Mingxiao Yang Xiaoqiang Wen Keping

(Xi'an Metro Co., Ltd., Xi'an 710018)

Abstract: Shield tunneling has been widely used in metro construction for its advantages. Based on the construction of Line 2 and Line 1 of Xi'an metro, this paper summarized and analyzed the strata traversed by the tunnels, the types, quantities and technical parameters of the adopted shield machines, construction schedules, approaches of shields driving into stations and so on. Authors expect to offer guidance for the selection and improvement of shield machines in the process of working out reasonable plans for metro projects in Xi'an area in the future.

Key words: urban rail transit; shield tunneling; strata; technical parameters, construction schedule