#### 文章编号:1009-6582(2023)01-0023-11

**DOI:** 10.13807/j.cnki.mtt.2023.01.003

**引文格式:**来弘鹏,姚毅,高强,等.地铁隧道穿西安地裂缝的研究进展及"先盾后扩"法的应用展望[J].现代隧道技术,2023,60 (1): 23=33+46.

DA Hongpeng, YAO Yi, GAO Qiang, et al. Research Progress of Subway Tunnel Passing Through Xi' an Ground Fracture and Application Prospect of "Shield Tunnelling before Expansion" Method[J].Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(1): 23-33+46.

# 地铁隧道穿西安地裂缝的研究进展 及"先盾后扩"法的应用展望

来 弘 鹏<sup>1</sup> 姚 毅<sup>1</sup> 高 强<sup>2</sup> 康 佐<sup>3</sup> (1.长安大学公路学院,西安 710064;2.广州地铁设计研究院股份有限公司,广州 510010; 3.西安市轨道交通集团有限公司,西安 710018)

摘 要:西安地裂缝是一种几乎覆盖整个市域范围的黄土地区典型地质灾害,其蠕变活动严重危害地铁隧道 安全,是地铁建设面临的一个重大技术难题。结合西安地铁十几年的地裂缝防治经验,从地裂缝分布及活动特征、 地铁面临的危害、设防理念与措施、设防参数、设防结构营运情况等方面进行了系统性梳理,着重分析了常规"暗 挖+盾构空推"工法存在的问题,并提出了一种"先盾后扩"新型建造技术。主要结论如下:(1)地铁隧道穿地裂缝段 的常规建造工法涉及竖井及横通道开挖、CRD法人工作业、盾构空推等一系列复杂流程,设防必要性及现有建造技 术复杂性之间的矛盾严重制约了西安地铁建设进程;(2)给出了"先盾后扩"新工法的建造流程、需解决的问题及工 程应用前景;(3)"先盾后扩"法通过结构及工法优化,确保了盾构作业的连续性,避免盾构洞内始发及接收,进而在 同等设防参数条件下减小设防断面,是实现地铁隧道便捷、低成本穿地裂缝段的一次重要探索与尝试。

关键词:地铁隧道; 西安地裂缝; 工程设防; 建造技术; "先盾后扩"法中图分类号:U231\*.3 文献标识码: A

## 1 引 言

在西安地铁建设推进过程中,地裂缝带、湿陷性 黄土地层和施工对古建筑的影响是工程建设所面临 的三大难题,其中地铁隧道频繁穿越广泛分布的活 动地裂缝带影响最为突出<sup>111</sup>。西安地裂缝位于临潼 一长安断裂F<sub>N</sub>西北侧,由多条总体呈东北一西南走 向的主地裂缝和次生地裂缝组成,是一种典型的黄 土地区地质灾害现象<sup>[2-5]</sup>。目前已发现的地裂缝几 乎覆盖整个西安市区,地铁隧道这一特殊的带状结 构物几乎不可能避开广泛分布的地裂缝,西安地铁 中长期规划的23条线路基本上都要穿越多条地裂 缝带。因此,研究地裂缝对地铁隧道的影响,并采取 有效的工程防治措施贯穿了西安地铁近十几年的发 展历程。 西安地裂缝的成因、危害和活动特性,文献中有 大量系统性的研究成果<sup>[2-8]</sup>。对地铁隧道而言,彭建 兵院士团队通过大型物理模型试验和数值模拟研究 表明,当地裂缝位错量超过200 mm时,无论明挖矩 形、暗挖马蹄形整体式衬砌隧道或盾构拼装式衬砌 隧道都将发生结构破坏<sup>[5]5]</sup>。邵生俊、李建军、熊田 芳等<sup>[16-18]</sup>也聚焦于地裂缝对地铁隧道的影响,从衬 砌结构受力和围岩变形的角度开展了大量研究工 作。考虑到地铁隧道的百年服役期,若不采取措施 直接穿越,仍将有较大的概率会发生衬砌结构安全 事故或渗漏水问题,给线路营运带来一定风险<sup>[6]</sup>。

关于地铁穿地裂缝段的灾害防治,文献[6,19,20] 进一步指出,考虑到地裂缝活动的复杂性和不确定 性,建议地铁隧道穿越时一律按照500mm变形量进 行设防;同时,鉴于西安地裂缝三维运动中水平张拉

第60卷第1期(总第408期),2023年2月出版

收稿日期:2022-03-31

修回日期:2022-05-11

**基金项目**:国家自然科学基金项目(51978064);广州地铁设计研究院股份有限公司科技项目(KY-2020-003);西安市轨道交通集团有限公司 科技项目(D15-YJ-152021006).

作者简介:来弘鹏(1979-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事隧道与地下工程方面的教学和研究工作,E-mail:laihp168@chd.edu.cn.

位移和错动位移较小,建议主要考虑垂直方向的变形。具体到防治措施及穿越段的地铁结构形式,西安地铁在建和已通车的各条线路基本采用"扩大断面,分段设缝"方案,核心理念为建设阶段按照一定的设防量提前预留地裂缝变形的扩大断面净空,后期再通过轨道调坡的方式来抵消地裂缝错动引起的列车建筑限界侵入,也由此确立了地铁穿西安地裂缝段的防治思路与方向<sup>[1,6]</sup>。

工程实施层面,目前常规工法为增设竖井和联 络通道后进行CRD法浅埋暗挖,待大断面隧道二次 衬砌浇筑后再盾构空推。由于该工法工序复杂,机 械化程度不高,地裂缝设防段的施工常常成为制约 整个区间隧道贯通的关键节点,也越来越难以满足 日益加快的地铁建设步伐。目前,扩挖法在公路隧 道改扩建中已较多应用,"先盾后扩"技术在地铁车 站建设中也积累了不少工程经验,借鉴该建造思路, 若盾构先行穿越地裂缝段,完成整个区间隧道的施 工,再拆除洞内管片进行扩挖,则能极大地简化施工 环节、缩短工期。相应地,地裂缝段在扩挖断面、作 业空间、超前加固条件、辅助通道、建造成本、沉降控 制要求等方面与公路隧道或地铁车站的扩挖存在本 质不同,现有成套技术无法直接应用,国内外也尚无 工程先例可供参考,因此有必要对该建造技术的可 行性和技术细节进行系统、深入的研究。

综上所述,地铁隧道穿西安地裂缝是一项复杂 的系统性工程,涉及地裂缝的活动特征、致灾机理、 地铁隧道结构适应性、设防理念及对策、建造技术等 一系列问题,有必要结合西安地铁十几年的防治经 验对已有研究成果进行系统性梳理和总结。此外, 现有"暗挖+盾构空推"的建造技术在工效、造价、施 工便利性等方面已难以满足日益加快的地铁建设步 伐和应用规模,有必要开展新的建造技术研究。本 文通过文献整理来厘清地铁隧道穿西安地裂缝的相 关技术成果,并对"先盾后扩"新型建造技术的工序、 可行性、存在问题及应用前景进行论述。

## 2 西安地裂缝特征及地铁穿越对策

#### 2.1 西安地裂缝的定义及分布

24

新修订的《西安地裂缝场地勘察与工程设计规 程》(DBJ 61/T 182—2021)吸收了近些年的研究成果 和工程实际经验,将西安地裂缝表述为:"在过量开 采 80~350 m承压水,产生不均匀地面沉降条件下, 临潼一长安断裂带西北侧(上盘)一组北东走向呈书 斜式构造的隐伏地裂缝出现活动,在地表形成的破 裂"<sup>[2]</sup>。同时,在分布与命名上,为防止编号混乱,将

> 第60卷第1期(总第408期),2023年2月出版 Vol.60, No.1 (Total No.408), Feb.2023

雁行式排列的f<sub>12</sub>、f<sub>13</sub>、f<sub>14</sub>地裂缝统一命名为f<sub>12</sub>,共包 含12条主地裂缝(f<sub>1</sub>~f<sub>12</sub>)和3条次生地裂缝(f<sub>5</sub>、f<sub>6</sub>、 f<sub>9</sub>)<sup>121</sup>。由图1可知,西安地裂缝的分布几乎覆盖整 个市区,中远期规划的23条线路与地裂缝的正交或 斜交穿越几乎成为必然。



图 1 西安地裂缝分布 Fig.1 Distribution of Xi' an ground fractures

## 2.2 西安地裂缝的活动特征

## 2.2.1 地裂缝的活动方式

宏观层面,西安地裂缝的活动以蠕变为主,如图 2所示,表现为上盘相对于下盘下滑的正断层特征, 其中下盘略为上升或稳定不动,整个过程可能持续 若干年<sup>[3-5]</sup>。进一步研究表明,地裂缝上下盘之间体 现出垂直位移、水平引张和水平扭动的三维运动特 征,其中垂直位移最大且具有单向累积特征<sup>[3,4]</sup>。因 此,西安首条地铁建设时,重点防治后续若干年内的 垂直方向累积变形对地铁结构的影响<sup>[19,20]</sup>。



图 2 西安地裂缝典型剖面位错示意 Fig.2 Typical profile of Xi'an ground fracture dislocation

## 2.2.2 地裂缝的活动趋势及速率

文献[3,4,19~22]将西安地裂缝的发展划分为: 发生、加速发展、成熟、减速、稳定5个阶段(图3),并



图3 西安地裂缝活动情况发展阶段[19,20]



指出目前及未来若干年活动速率在5 mm/a以内或 进一步降低,因构造运动而重新增强的可能性极小。 西安首条地铁建设时就是基于上述论断和各条地裂 缝的最大历史活动情况,考虑地铁隧道的百年服役 期及地裂缝活动的不确定性,提出地铁隧道穿越段 垂直位移统一按500 mm设防。

对地裂缝的活动监测也在持续开展,从2009—2020年的地表活动情况看,在严格落实禁采地下承压水的措施下,西安绝大部分地裂缝活动已基本稳定,仅鱼化寨、电子城、三爻村等局部地区的地表沉降较大<sup>[23-29]</sup>。Peng等<sup>[26]</sup>结合西安地铁营运线路的变形监测数据指出,1号线总体稳定,3号线西段(穿*f*<sub>4</sub>)、2号和4号线南段(按新规程的编号穿*f*<sub>1</sub>2)的变形较大。后续相关研究开始关注位错量小于100 mm时盾构隧道直接穿越的可行性,相关成果在西安地铁8号线进行试点应用<sup>[30]</sup>。

#### 2.3 西安地裂缝对地铁隧道的影响

(1) 衬砌变形破坏

地裂缝错动下地铁结构破坏形式汇总于表1。 正交时破坏形式表现为拉张-挤压破坏和直接剪切 变形破坏。地铁与地裂缝斜交时更为复杂,在正交 破坏的基础上又叠加了非对称的弯曲和扭转变形, 规范在地铁线路无法避让地裂缝的条件下,建议尽 量大角度穿越,即基于上述分析,最小交角不应小于 30°<sup>[31,32]</sup>。

#### 表1 地裂缝错动下的衬砌破坏形式汇总 Table 1 Summary of lining failure modes under the ground fracture dislocation

衬砌类型		破坏形式	
		正交	斜交
整体式	暗挖马蹄形	拉张-挤压	张拉-扭剪
	明挖箱形	拉张-挤压	张拉-扭剪
盾构圆形拼装式衬砌		直接剪切	扭剪

#### (2) 防水失效

无论整体或拼装式衬砌,结构本身都是重要的 自防水屏障。盾构隧道管片接缝位置更是薄弱环 节,环缝张开量超过6mm便可造成防水失效<sup>[3]</sup>。错 动情况下,因衬砌裂缝或盾构隧道管片拼装接缝增 大而出现的渗漏水问题将先于结构破坏发生,恶化 地铁营运环境,加速附属设施腐蚀及老化。

(3) 限界侵入和轨道变形

规范对确保列车和相关设备安全运营的限界富 余量要求在50~200 mm<sup>[34]</sup>,轨道的沉降变形更应控 制在15 mm范围内<sup>[35]</sup>。地裂缝错动引起衬砌结构变 形,并逐步传导至道床及轨道,跨地裂缝断面的轨道 变形、隧道净空减少和限界入侵必然会影响地铁安 全运行。

#### 2.4 地铁穿地裂缝段工程防治

#### 2.4.1 防治思路

综合西安地铁十几年来的地裂缝防治经验和相 关科研成果<sup>[6,19,20,31,36]</sup>,目前总体防治思路见表2。

表2	地铁穿西安地裂缝防治思路	

Table 2	Prevention and control ideas of subway passing
;X-)-'	through Xi'an ground fractures

A. *	
类型	防治思路
地铁车站	避让为主
	与地裂缝近似平行时,避让为主,有条件宜置于
	<sup>1</sup> 禄定的下盘,且(1)位丁上盈时,取小班证距离
	40 m;(2 / 位 丁 千 益 可 , 取 小 姓 山 距 丙 24 m
区间隧道	交叉穿地裂缝时,线路与地裂缝交角不应小于
	30°,且(1)位错量≤100 mm,盾构隧道直接穿越;
	(2)位错量>100 mm,早期线路统一按500 mm
	变形量设防;后续按照百年实际位错量设防

点状分布的地铁车站、与地裂缝近似平行的区间隧道均具备避让条件,应以避让为主,且宜置于相对稳定的下盘地层中并保持一定的避让距离。区间隧道无法避让时,应尽量正交或大角度穿越,与地裂缝走向的交角不应小于30°,否则应局部调整线路走向<sup>[31]</sup>,具体防治措施见表2。

#### 2.4.2 地裂缝段地铁设防措施

基于西安地裂缝的活动特征及对地铁隧道的影响,具体的工程设防结构从西安地铁建设初期就开展了一轮大讨论,见表3。

结构自适应方案是最理想的主动设防措施,但 工程结构复杂、造价高,现有技术条件下大量技术细 节问题仍未解决,目前仍停留在工程设想阶段,但却

第60卷第1期(总第408期),2023年2月出版

表3 地铁穿西安地裂缝段结构设防方案汇总

 
 Table 3
 Summary of structural fortification schemes for subway passing through Xi' an ground fractures

方案	方案说明	
隧底蛇形 弹簧 <sup>[37]</sup>	隧底埋置蛇形弹簧,以弹簧纵向运动调节结 构标高来适应地裂缝错动,衬砌可绕两侧的 铰转动	
悬臂滑动 隧道 <sup>[38]</sup>	具有一定刚度的整体式衬砌从稳定的下盘 悬臂深入上盘地层约5m,再设置与地裂缝 倾角一致的滑动面,连接上盘断面加高的整 体式衬砌,悬臂结构底部留注浆孔,以滑动 面处的变形来适应地裂缝错动	
简支梁 隧道 <sup>[38]</sup>	地裂缝两侧设桩基与承台,梁型隧道简支跨 地裂缝,通过梁型隧道的整体倾斜来抵抗地 层错动,防止结构破坏	
结构 自适应 <sup>[37]</sup>	类似于"管中管"结构,在地铁隧道外围设置 更大断面结构,并进行可变动式连接(弹簧、 千斤顶、填充物),通过外围结构和中间连接 层的变形抵消地裂缝错动,地铁隧道始终处 于最佳状态	
扩大断面, 分段设缝 <sup>[6,39]</sup>	地裂缝段根据位错量采用扩大断面整体式 衬砌,预留额外的建筑限界净空,并分段设 置变形缝防止结构破坏,地裂缝变形后再调 整轨道标高,确保正常营运	



(a) 设防结构

是未来的一个发展方向。其他几种被动设防方案 中,仅"扩大断面,分段设缝"方案有类似的工程案 例<sup>[40]</sup>。综合安全性、工程造价、可实施性和后期维护 便利性等因素,该方案最终在西安首条地铁线路(2 号线)中应用,也由此确立了地铁穿西安地裂缝的防 治方向,如图4所示。

变形缝处的防水措施、安全和便捷的可调整轨 道结构是该方案的辅助配套措施<sup>[41,42]</sup>。目前广泛应 用的防水结构形式见图4(a)。可调式框架板整体 道床是西安地铁穿地裂缝段的配套特殊轨道结构, 具备结构简单、可调范围大、调整便捷等特点,通过 扣件系统和不同厚度的铁垫板、橡塑垫板、混凝土垫 块来实现累计600 mm以上的调整量,并在此基础上 开展了进一步的快速调整优化相关研究<sup>[42]</sup>。

## 2.4.3 地裂缝段设防参数

(1) 地裂缝垂直位错

地铁隧道穿地裂缝段的工程设防参数一般在百年服役期预估最大垂直位错A<sub>1</sub>的基础上乘以安全系数1.5,即A=1.5A<sub>1</sub>。地裂缝错动具有随机性,实际应用中不可能取若干个设防值,综合安全和工程经济性,目前的垂直位错设防参数见表4。

(2)结构抗裂预留位错量

地裂缝的垂直位错传导至隧道衬砌结构则表现



(b) A-A设防断面(A型车)



为放大后的三维运动特征,对预留接缝部位的变形 适应能力提出一定挑战。文献[43]通过空间几何投 影,在地铁与地裂缝正交工况中,垂直位错为Amax时 需预留的接缝部位轴向拉伸位移为:

$$\Delta A_{\rm axi} = \frac{A_{\rm max}}{\tan\beta} \tag{1}$$

斜交工况下更为复杂,需预留的轴向拉伸位移

26 第60卷第1期(总第408期),2023年2月出版

Vol.60, No.1 (Total No.408), Feb.2023

ΔA'axi、水平横向位移ΔA'h分别为:

$$\Delta A'_{axi} = \Delta A_{axi} \sin \left( 90^{\circ} - \theta \right) = \frac{A_{max}}{\tan \beta} \cos \theta$$
(2)  
$$\Delta A'_{h} = \Delta A_{axi} \cos \left( 90^{\circ} - \theta \right) = \frac{A_{max}}{\tan \beta} \sin \theta$$
(3)

式中:β为地裂缝倾角;θ为地铁线路与地裂缝斜交时的夹角。

表4 地铁穿西安地裂缝垂直位错设防参数 Table 4 Fortification parameters of vertical dislocation of subway passing through Xi' an ground fractures

百年预估	设计值/mm	
位错量 $A_1$	考虑安全系数A=1.5 A1	实际设防量A <sub>max</sub>
山山井石広心	<i>A</i> ≤100	100
田地砌及空短	100 <a≤300< td=""><td>300</td></a≤300<>	300
公式佣定	300 <a< td=""><td>500</td></a<>	500

#### (3) 扩大断面隧道的长度

穿地裂缝段的地铁隧道纵向影响范围见图 5, 文献[44]通过模型试验表明,正交工况下,上、下盘 的影响区范围分别为17.5 m和12.5 m,实际工程设防 参数在此基础上乘以安全系数2.0,即*D*<sub>1</sub>=25 m,*D*<sub>2</sub>= 35 m,理论设防总长度为60 m。斜交工况下根据几 何投影<sup>[44]</sup>,纵向设防长度*L*<sub>3</sub>为:

$$L_{3} = L_{1} + L_{2} = \frac{D_{1}}{\sin\theta} + \frac{D_{2}}{\sin\theta} = (D_{1} + D_{2})/\sin\theta \quad (4)$$



## 图 5 地铁穿西安地裂缝段的纵向设防范围 Fig.5 Longitudinal fortification range of subway passing through Xi´an ground fracture section

"扩大断面,分段设缝"方案中,为了在纵向范围 满足隧道界限控制要求,实现地裂缝错动后调整线 路纵坡(图4(a)),规范<sup>31</sup>给出的上盘调坡范围*L*为:

$$L = A_{\max} / (i_1 - i_0)$$
 (5)

式中:io为原线路纵坡坡率;ii为调整后坡率。

调坡段L一般不小于整列列车的长度,且远大 于地裂缝上盘影响区范围,因此,整个扩大断面隧道 段的长度为下盘设防长度L<sub>1</sub>(正交时为D<sub>1</sub>)加上调坡 段长度L,即:

$$L_{\text{total}} = L + L_1 \tag{6}$$

或: 
$$L_{\text{total}} = L + D_1$$
 (7)

式中,L<sub>total</sub>为扩大断面段的隧道长度,西安地铁实际

工程一般在200m左右。

(4) 扩大断面隧道的变形缝设置

变形缝设置模式及间距与地铁穿地裂缝的交角 相关<sup>[45]</sup>,见表5和图6。交角θ≤45°时采用对缝模式, 上下盘各有一节衬砌骑跨地裂缝;交角θ>45°时采 用骑缝模式,仅下盘的一节衬砌骑跨地裂缝。

#### 表5 地裂缝段隧道变形缝设置间距

#### Table 5 Setting spacing of deformation joints of the tunnel in the ground fracture section

交角	变形缝	变形缝间距ΔL	
$ heta/(^\circ)$	模式	第一道	其他各道
≤45	对缝	上下盘各15 m	主变形区10m/道;微
>45	骑缝	下盘20 m	变形区15~20 m/道





Fig.6 Schematic diagram of tunnel deformation joints in the ground fracture section

## 3 穿地裂缝段地铁隧道施工

目前,地铁隧道穿地裂缝段的常规工法为:通过 增设竖井和横通道来创造工作面,再浅埋暗挖施工。 由于暗挖隧道断面大(图4(b))、城区地表沉降控制 要求严格(一般不超过3 cm),通常采用CRD法开 挖,见图7。待总长为Lotal的扩大断面隧道贯通后, 拆除临时支撑、浇筑二次衬砌,然后盾构洞内接收、 空推、洞内二次始发,端头土体加固,见图8。西安 地铁建设中常采用洞内深孔注浆加固方式,纵向加 固范围 a 一般不小于8 m,盾构隧道上下的加固范 围 b 和 c 一般分别不小于4 m 和 2 m,并根据地层情 况进行调整。

第60卷第1期(总第408期),2023年2月出版



#### 图7 地裂缝段扩大断面隧道施工示意

Fig.7 Schematic diagram of the tunnel construction with an expanded section in the ground fracture section





综合西安地铁隧道穿地裂缝段"暗挖+盾构空 推"施工十几年来的相关工程经验,现有建造技术 面临如下方面的挑战:

(1)建造成本。竖井及两处端头加固均为额外 增加的工程量,提高了建造成本。在埋深较大的工 况中,竖井成本将进一步提升。

(2) 工效及工期。图4(b)为西安地裂缝段目前 单洞最大的设防断面,采用CRD法开挖时单个导洞 最大开挖范围不足5m,机械化施工难度大,常采用 人工开挖及支护,工效较低。暗挖段一般位于施工 关键线路上,若竖井作业条件受限或整体施工组织 不紧凑,可能出现盾构等暗挖作业的尴尬局面,造成 资源及工期浪费。

(3)施工控制。CRD法开挖多次扰动,部分区 域会出现地表沉降超限问题;盾构空推施工流程复 杂、难度大,除始发及接收环节的工程风险外,盾构 轴线偏差、已拼装管片的上浮、接缝渗漏水及破损、 暗挖隧道仰拱平整情况影响盾构空推效率等都是易 出现的问题。 当然,地裂缝段地铁建造技术在十几年中也进行了相关优化和改进。然而,"暗挖+盾构空推"工 法框架下,工序复杂性的问题仍未解决,甚至成为制 约西安地铁建设进程的一个重要因素。

## 4 地裂缝段先盾后扩新型建造技术

扩挖法在山岭隧道线路升级改造中应用较广, 盾构隧道扩挖一般常见于一些不具备地表作业条件 的暗挖车站、联络线与区间隧道接岔段等。从既有 隧道扩挖法的特点看,由于作业条件、辅助通道与措 施、造价与工期等方面的差异,很难直接将扩挖法应 用于地裂缝段,由此本文提出一种地裂缝段"先盾后 扩"建造工法。

#### 4.1 扩挖断面及结构尺寸优化

扩挖理念下无需盾构空推,因此扩挖断面可仅 考虑特殊变形缝处扩大接头及垂直位错设防量。 按照目前500 mm的最大设防条件,即使不优化轨 面标高,扩挖尺寸也可较图4(b)减小至8 m左右, 见图9(a)。若优化断面,调整盾构及扩挖隧道断面 标高,见图9(b)和(c),保留底层管片作为扩挖隧道 初期支护的一部分,则扩挖尺寸能进一步减小。扩 挖方向主要集中在拱顶,作业条件及空间也更适



expanded excavation tunnel

 28
 第 60卷第 1期 (总第 408 期), 2023年2月出版

 Vol.60, No.1 (Total No.408), Feb.2023

宜。同时,无需仰拱开挖,底部运输通道能始终保 持通畅,支护结构通过螺栓孔连接迅速闭合成环, 利于变形控制。变形缝设置形式和间距可继续沿 用已有方案,最终实现不降低设防等级条件下减小 设防断面。

## 4.2 建造流程

"先盾后扩"法主要包括盾构先行穿越、地层加固及扩挖施工三个主要流程。

### 4.2.1 盾构先行穿越

为方便后续作业,盾构掘进时对管片结构及拼装方式进行相关优化,包括:

(1)扩挖段通缝拼装,封顶块置于拱顶正中央, 且根据不同地层条件下的扩挖进尺选择适宜的管片 环宽w(如1.0m、1.2m或1.5m),见图10。



图 10 地裂缝扩挖段盾构管片拼装示意 Fig.10 Schematic diagram of shield segment erection for tunnel enlarging in the ground fracture section

(2)改变封顶块楔形角度,以便于拆除,见图9 (b);从重复利用的角度扩挖段也可考虑采用钢管片。

### 4.2.2 扩挖前地层加固

前几环管片扩挖时通过拱部预留注浆孔径向注 浆或地表注浆,待开挖3~4环创造作业空间后改为斜 向超前加固,避免增设竖井来创造工作面,见图11。 径向加固范围*h*<sub>1</sub>和斜向加固的长度*h*<sub>2</sub>、仰角α2需根 据地层条件确定。在地表条件允许的情况下,也可 选择地面加固方式。

#### 4.2.3 扩挖施工

横断面作业流程见图 12。

(1) 在地层加固条件下, 先环形掏土开挖并支 护, 上半断面开挖范围以邻接块拱脚为界, 并加强锁 脚。

(2) 通过安装在轨道车上的设备(类似盾构机 的整圆器)来拆除封顶块及两个邻接块。

(3)拆除两侧标准块。

(4) 开挖下半断面并支护,通过螺栓孔与底层 管片连接,迅速封闭成环。

(5) 扩挖结构整环闭合后进行下个作业循环。前



(b) 后续环斜向加固

#### 图11 地裂缝扩挖段地层加固示意





几环施工时略有不同,需先拆除上半断面管片,再扩 挖和支护,因此要保证地层加固效果。

#### 4.3 需重点关注的问题

地裂缝段隧道扩挖断面相对较小,其核心在于 减少辅助通道及措施的条件下,通过结构和工法优 化,实现便捷、低成本的地裂缝段地铁穿越,因此还 涉及一系列的理论及技术支撑问题,需要细化:

(1) 盾构及扩挖隧道组合结构受力特性。图9

第60卷第1期(总第408期),2023年2月出版 29

(b)从方便拆除的角度优化调整封顶块楔形角度,这 将改变管片横断面受力特性,增加螺栓剪应力。保 留底层管片作为扩挖隧道结构的一部分,管片-喷 混凝土复合结构在施工过程中的受力特性需重点关 注。

(2)管片纵向应力释放问题。管片拆除引起纵向应力损失,一是盾构隧道的纵向刚度减小,在地层应力作用下发生变形;二是管片环缝增大,对扩挖段两侧的永久管片而言,若超过6mm的极限张开量将造成盾构隧道自防水性能失效。因此需根据地层情况预估盾构隧道变形及环缝张开量,并在一定范围内提前采取纵向拉紧措施。

(3)扩挖施工参数及地层变形控制。盾构穿越 时扰动周边地层,改变地层参数及应力场;扩挖作业 是在扰动后的地层环境中进行,情况较为复杂。城 区范围对施工影响的要求较高,为控制地层变形并 兼顾工程经济性,需根据现场实际采用适宜的地层 加固及开挖进尺等施工参数,并在盾构隧道拼装时 就对扩挖段的管片环宽进行统筹。在预估扩挖施工 引起的地层沉降方面,目前应用较广的Peck公式存 在地层损失率这一经验参数如何合理取值的问题。 此外,扩挖结构闭合成环前,图12中各作业环节的 地层稳定性问题也应重点关注。

(4)配套机械设备及施工组织。盾构隧道管片 单块自重达几百公斤,要完成管片拆除需配套的施 工机械设备进行辅助;拆除的管片、扩挖土体、扩挖 隧道支护材料等都通过盾构隧道进出,对施工组织 要求较高,否则可能影响整体效果。

## 5 结 论

30

地铁隧道穿西安地裂缝是一个复杂、长久的系统性工程,从已开通线路十几年的营运状况看,设防段隧道结构基本稳定,这与严格落实禁采地下承压水措施,西安地裂缝活动趋于稳定的预期一致,甚至远低于预估位错量。因此,学术和工程界开始讨论、反思穿地裂缝段地铁设防"风险-投入"平衡问题以及现有设防理念是否偏保守。对地铁这个关系国计

民生及城市发展的公共基础设施而言,从百年服役 期及地裂缝活动的不确定性角度出发,足够的安全 冗余是有利和必要的,但目前采用的"暗挖+盾构空 推"工法建造流程较为繁琐,造价、工效及工程实施 方面存在诸多不便,甚至制约了西安地铁建设进程。 本文提出的"先盾后扩"法就是在坚持既有设防标准 的前提下,从建造技术层面大幅降低设防难度。新 工法成熟后,在有条件的情况下甚至可考虑盾构隧 道贯通后正常营运,并做好相关预留措施、加强监 测,后续再根据地裂缝活动情况便捷扩挖、调整轨道 纵坡,从设防理念上谋求突破。通过系统性梳理地 铁隧道穿西安地裂缝相关研究成果和工程防治经 验,本文主要结论如下:

(1)"扩大断面,分段设缝"是现阶段地铁隧道 穿地裂缝段主要的设防结构,常采用"暗挖+盾构空 推"的建造工法,涉及竖井及横通道开挖、CRD法人 工作业、盾构洞内接收及始发等一系列繁杂的施工 环节。地裂缝段工程设防的必要性及设防结构建造 技术复杂性之间的矛盾是制约西安地铁建设进程的 一个重要因素。

(2)"先盾后扩"法的核心在于减少辅助通道及 措施的条件下,通过结构和工法优化,实现便捷、低 成本的地裂缝段地铁隧道穿越。新工法可确保盾构 作业连续性,进而在同等设防标准条件下减小扩挖 断面,取消竖井也降低了施工作业围挡对地面交通 和环境的影响。

(3)"先盾后扩"法的难点在于配套机械设备及 "盾-拆-扩"全流程的施工组织。盾构穿越时按特 定的标高、环宽、方式来拼装扩挖段管片并做好相关 预留措施,后续通过配套的设备按既定顺序进行地 层加固、管片拆除和扩挖作业。

(4)"先盾后扩"法还需进一步深化和完善隧道 组合结构受力特性、管片纵向应力松弛、地层变形控 制及预测等方面的理论和技术支撑,并根据试点情 况进行工程应用层面的优化与改进,这将是地铁穿 西安地裂缝段的一次重要探索与尝试。

自技术

#### 参考文献

#### References

[1] 黄强兵. 地裂缝对地铁隧道的影响机制及病害控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.

HUANG Qiangbing. Study on Effect of the Active Ground Fissure on Metro Tunnel and Its Hazards Control[D]. Xi' an: Chang' an University, 2009.

[2] 机械工业勘察设计研究院有限公司, 西安市自然资源和规划局, 中国建筑西北设计研究院有限公司, 等. 西安地裂缝场地勘

第60卷第1期(总第408期),2023年2月出版

Vol.60, No.1 (Total No.408), Feb.2023

察与工程设计规程: DBJ 61/T 182—2021[S]. 西安: 陕西省住房和城乡建设厅, 2021.

China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi' an Natural Resources and Planning Bureau, China Northwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., et al. Specification for Site Investigation and Engineering Design on Xi' an Ground Fractures: DBJ 61/T 182—2021[S]. Xi' an: Shaanxi Provincial Department of Housing and Urban Rural Development, 2021.

[3] 彭建兵,张勤,黄强兵,等.西安地裂缝灾害[M].北京:科学出版社,2012.

<sup>2</sup>PENG Jianbing, ZHANG Qin, HUANG Qiangbing, et al. Ground Fissure Hazards in Xi'an[M]. Beijing: Science Press, 2012. [4] 门玉明, 石玉玲. 西安地裂缝研究中的若干重要科学问题[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(2): 172-176.

MEN Yuming, SHI Yuling. Some Important Scientific Questions in the Research on Xi' an Ground Fissures[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(2): 172–176.

- [5] 赵超英,张勤,丁晓利,等.基于InSAR的西安地面沉降与地裂缝发育特征研究[J].工程地质学报,2009,17(3):389-393. ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, DING Xiaoli, et al. InSAR Based Evaluation of Land Subsidence and Ground Fissure Evolution at Xi'an[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(3): 389-393.
- [6] 黄强兵, 彭建兵, 樊红卫, 等. 西安地裂缝对地铁隧道的危害及防治措施研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 781-788. HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, FAN Hongwei, et al. Metro Tunnel Hazards Induced by Active Ground Fissures in Xi'an and Relevant Control Measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 781-788.
- [7] PENG J B, SUN X H, WANG W, et al. Characteristics of Land Subsidence, Earth Fissures and Related Disaster Chain Effects with Respect to Urban Hazards in Xi ' an, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(16): 1190.
- [8] PENG Jianbing, QU Wei, REN Jun, et al. Geological Factors for the Formation of Xi ' an Ground Fractures[J]. Journal of Earth Science, 2018, 29(2): 468–478.
- [9] 彭建兵, 胡志平, 门玉明, 等. 马蹄形隧道40°斜穿地裂缝的变形破坏机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2258-2265.

PENG Jianbing, HU Zhiping, MEN Yuming, et al. Test Study of Deformation and Damage Mechanism of Horseshoe-shaped Tunnel Crossing Ground Fissure with 40°[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2258–2265.

- [10] 范文, 熊炜, 彭建兵, 等. 分段式地铁隧道穿越地裂缝带的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 138-143. FAN Wen, XIONG Wei, PENG Jianbing, et al. Model Tests on Segmental Subway Tunnel Crossing Ground Fissure Belt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 138-143.
- [11] 黄强兵, 彭建兵, 石玉玲, 等. 地裂缝活动对地铁区间隧道地层应力与位移影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1525-1532.

HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, SHI Yuling, et al. Experimental Study on Effect of Active Ground Fissures on Stress and Displacement Change Laws of Strata Near Metro Tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1525–1532.

[12] 胡志平, 彭建兵, 王启耀, 等. 盾构隧道 60°斜穿地裂缝的变形破坏机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 176-183.

HU Zhiping, PENG Jianbing, WANG Qiyao, et al. Modeling Test Research on Failure Mechanism of Shield Tunnel Crossing Ground Fissure with 60°[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 176–183.

- [13] 范文,邓龙胜,彭建兵,等. 地铁隧道穿越地裂缝带的物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1917-1923. FAN Wen, DENG Longsheng, PENG Jianbing, et al. Research on Physical Model Experiment of Metro Tunnel Crossing Ground Fissure Belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1917-1923.
- [14] PENG Jianbing, HUANG Qiangbing, HU Zhiping, et al. A Proposed Solution to the Ground Fissure Encountered in Urban Metro Construction in Xi'an, China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 61: 12–25.
- [15] 黄强兵, 彭建兵, 门玉明, 等. 地裂缝对地铁明挖整体式衬砌隧道影响机制的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2324-2331.

HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, MEN Yuming, et al. Model Test Study on Effect of Ground Fissure on Open-cut Metro Funnel with Integral Lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2324–2331.

[16] 李建军, 邵生俊, 熊田芳. 隧道斜交穿越地裂缝的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增1): 115-120+126.
 LI Jianjun, SHAO Shengjun, XIONG Tianfang. Research on Physical Model Experiment of Tunnel Obliquely Crossing a Ground Fissure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 115-120+126.

[17] 邵生俊, 佘芳涛, 郑万坤. 地裂缝隧道衬砌结构与围岩相互作用机理[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(5): 634-638.

第60卷第1期(总第408期),2023年2月出版

SHAO Shengjun, SHE Fangtao, ZHENG Wankun. Analysis on Interaction Mechanism between Tunnel Structure and Surrounding Soil under Action of Vertical Ground-fissure[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(5): 634–638.

[18] 熊田芳, 邵生俊, 王夭明, 等. 西安地铁正交地裂缝隧道的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 179-186.

- XIONG Tianfang, SHAO Shengjun, WANG Tianming, et al. Research on Physical Model Experiment of Xi' an Metro Tunnel Orthogonally Crossing Ground Fissure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 179–186.
- [19] 黄强兵, 彭建兵, 范文, 等. 西安地铁二号线沿线地裂缝未来位错量估算及工程分级[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 469-474.

HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, FAN Wen, et al. Estimation of the Maximum Displacement of Ground Fissures along Xi' an Metro Line 2 and Its Engineering Classification[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 469–474.

- [20] LIU Nina, HUANG Qiangbing, FAN Wen, et al. Seismic Responses of a Metro Tunnel in a Ground Fissure Site[J]. Geomechanics and Engineering, 2018, 15(2): 775–781.
- [21] 杨 兆, 黄强兵, 王立新, 等. 西安地裂缝场地地铁隧道盾构法施工沉降分析[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(2): 95-103. YANG Zhao, HUANG Qiangbing, WANG Lixin, et al. Analysis on the Construction Settlement of Metro Tunnel by Shield Method in Xi'an Ground Fissure Site[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(2): 95-103.
- [22] LIU Nina, HUANG Qiangbing, WANG Li, et al. Dynamic Characteristics Research of a Ground Fissure Site at Xi' an, China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 182-190.
- [23] LI Youli, YANG Jingchun, HU Xiaomeng. Origin of Ground Fissures in the Shanxi Graben System, Northern China[J]. Engineering Geology, 2000, 55(4): 267–275.
- [24] LEE C F, ZHANG J M, ZHANG Y X. Evolution and Origin of the Ground Fissures in Xi 'an, China[J]. Engineering Geology, 1996, 43(1): 45–55.
- [25] QU Feifei, ZHANG Qin, LU Zhong, et al. Land Subsidence and Ground Fissures in Xi 'an, China 2005–2012 Revealed by Multiband InSAR Time-series Analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 255: 366–376.
- [26] PENG Mimi, ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, et al. Research on Spatiotemporal Land Deformation (2012–2018) over Xi' an, China, with Multi-sensor SAR Datasets[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 664.
- [27] 赵超英,张 勤,朱 武,等. 采用TerraSAR-X 数据监测西安地裂缝形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(1): 81-85. ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, ZHU Wu, et al. Monitoring on Xi' an Ground Fissures Deformation with TerraSAR-X Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(1): 81-85.
- [28] 董 英, 张茂省, 刘 洁, 等. 西安市地下水与地面沉降地裂缝耦合关系及风险防控技术[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 95-102. DONG Ying, ZHANG Maosheng, LIU Jie, et al. Coupling Relationship between Groundwater and Ground Fissures of Land Subsidence in Xi' an City and Risk Prevention and Control Technology[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 95-102.
- [29] 彭米米, 赵超英, 张 勤, 等. 利用 Sentinel-1A 数据监测大西安 2015-2017 年地面沉降[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2264-2269.

PENG Mimi, ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, et al. Monitoring Xi ' an Land Subsidence during 2015–2017 Using Sentinel–1A Images [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(6): 2264–2269.

- [30] 苟玉轩. 地裂缝场地地铁盾构隧道性状及适宜性研究[D]. 西安: 长安大学, 2020 GOU Yuxuan. Study on the Structural Behaviors and Adaptability of Metro Shield Tunnel Crossing Ground Fissure Site[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [31] 长安大学, 西安市地下铁道有限责任公司, 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 等. 城市轨道交通隧道穿越地裂缝段技术规范: DBJ 61/T 113—2016[S]. 西安: 陕西省住房和城乡建设厅, 2016.

Chang' an University, Xi' an Metro Co., Ltd., China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., et al. Technical Specification for Urban Rail Transit Tunnel Crossing Ground Fracture Belt: DBJ 61/T 113—2016[S]. Xi' an: Shaanxi Provincial Department of Housing and Urban Rural Development, 2016.

[32] 李凯玲, 门玉明, 严静平, 等. 地铁隧道正交穿越地裂缝的相互作用机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 556-563.

LI Kailing, MEN Yuming, YAN Jingping, et al. Test Study of Interaction Mechanism under Metro Tunnel Orthogonally Crossing Ground Fissure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 556–563.

[33] 姚文博, 贺少辉, 张嘉文, 等. 热力盾构隧道先盾后井施工衬砌接头变形机理与控制[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6): 1056-1065.

第60卷第1期(总第408期),2023年2月出版

YAO Wenbo, HE Shaohui, ZHANG Jiawen, et al. Deformation Mechanism and Control Technology of Segment Joints during Process of Shield Tunneling prior to Shaft Excavation in a Heat-supplying Tunnel Project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6): 1056-1065.

[34] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范: GB 50157-2013[S]. 北 京:中国建筑工业出版社,2013.

Winistry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

[35] 李兴高. 既有地铁线路变形控制标准研究[J]. 铁道建筑, 2010(4): 84-88.

LI Xinggao. Study on Deformation Control Standard of Existing Metro Line[J]. Railway Engineering, 2010(4): 84-88.

[36] 苟玉轩, 黄强兵, 王立新, 等. 地裂缝环境下盾构隧道结构性状及适应性研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(6): 117-125. GOU Yuxuan, HUANG Qiangbing, WANG Lixin, et al. Study on Structural Behaviors and Adaptability of Shield Tunnel in the Ground Fissure Environment[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(6): 117-125.

[37] 樊红卫. 西安地铁一号线通过地裂缝对策研究[C]//城市轨道交通首届中青年专家论坛文集. 北京: 兵器工业出版社, 2002: 105-109.

FAN Hongwei. Study on the Countermeasure for the Xi' an Metro Line 1 Crossing Ground Fissures[C]// Proceedings of the First Young and Middle-aged Experts Forum on Urban Rail Transit. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2002: 105-109

[38] 杨育僧, 杨 骏. 西安地铁区间隧道通过地裂缝带的方案探讨[J]. 都市快轨交通, 2006, 19(3): 67-69.

YANG Yuseng, YANG Jun. A Scheme for the Transit Tunnels of Xi' an Metro to Pass through Ground Cracks[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2006, 19(3): 67-69.

- [39] 樊红卫. 西安地铁2号线穿越地裂缝的技术措施[J]. 都市快轨交通, 2008, 21(4): 19-22+30. FAN Hongwei. Technical Measures for Xi' an Subway Line 2 to Traverse Ground Fissures[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2008, 21 (4): 19-22+30.
- [40] STIRBYS A F, RADWANSKI Z R, PROCTOR R J, et al. Los Angeles Metro Rail Project-Geologic and Geotechnical Design and Construction Constraints[J]. Engineering Geology, 1999, 51(3): 203-224.
- [41] 王超. 西安地铁地裂缝隧道新型防渗技术的模型试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010. WANG Chao. The Model Test Research of New Anti-seepage Technique in Xi' an Subway Tunnel under Ground Crack Action[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [42] 常卫华, 魏周春, 林士财. 西安地铁地裂缝段可快速升降轨道结构研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(9): 80-83. CHANG Weihua, WEI Zhouchun, LIN Shicai. Study on Rapid Lifting Track Structure of Xi' an Metro in Ground Fissure Section[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(9): 80-83.
- [43] 黄强兵, 彭建兵, 王启耀, 等. 地铁隧道穿越地裂缝带的结构抗裂预留位移量[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 2669-2675.

HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, WANG Qiyao, et al. Reserved Displacements for Anti-crack Design of Metro Tunnel Passing through Active Ground Fissure Zones[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2669-2675.

- [44] 黄强兵, 彭建兵, 高虎艳, 等. 地铁隧道斜交穿越地裂缝带的纵向设防长度[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 73-78. HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, GAO Huyan, et al. The Longitudinal Fortified Length of Metro Tunnel Obliquely Crossing the
- Active Ground Fissure Zones[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 73-78. [45] 黄强兵,姜紫看,邓亚虹,等.穿越地裂缝带地铁隧道结构分段长度优化研究[J].水文地质工程地质,2019,46(2):109-117.
- HUANG Qiangbing, JIANG Zikan, DENG Yahong, et al. Optimal Length for Segmented Structure of the Metro Tunnel Obliquely 现代的教徒技术 Crossing Active Ground Fissure Zone[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46(2): 109–117.

(下转第46页)

33

第60卷第1期(总第408期),2023年2月出版

Vol.60, No.1 (Total No.408), Feb.2023