

DOI: 10.7672/sgjs2026010056

# 推拼同步盾构机盾尾加长对盾壳力学性能的影响研究\*

姜海波<sup>1</sup>, 毕湘利<sup>1</sup>, 刘洪波<sup>1</sup>, 吴迪<sup>1</sup>, 管攀峰<sup>2</sup>, 朱叶艇<sup>3</sup>

(1. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 201103; 2. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235;  
3. 上海隧道工程有限公司, 上海 200232)

**[摘要]** 针对推拼同步盾构法隧道施工中盾尾加长的设计需求及其潜在风险, 以上海地铁某盾构隧道区间工程为背景, 通过构建盾构机盾壳三维有限元模型, 研究了盾壳结构在水土荷载下的力学响应。重点探讨了盾尾长度和覆土厚度对盾壳应力与变形的影响。结果表明, 在设计覆土厚度(25m)和盾尾长度(3.65m)下, 盾壳结构有足够的强度和变形裕量; 盾壳的最大变形和应力随盾尾长度线性增大, 随覆土深度非线性增大, 同时显著受到几何初始缺陷的影响; 设计上应综合考虑埋深变化以及几何初始缺陷, 针对性地进行盾尾加长设计, 以确保盾尾最大变形小于盾构俯仰掘进下的最小盾尾间隙。

**[关键词]** 地铁; 盾构; 盾壳; 盾尾; 数值模拟; 应力; 变形

**[中图分类号]** U45

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2026)01-0056-06

## Influence of Shield Tail Extension on Mechanical Behavior of Shield Shell of Shield Tunneling Machines with Simultaneous Excavation and Lining Assembly

JIANG Haibo<sup>1</sup>, BI Xiangli<sup>1</sup>, LIU Hongbo<sup>1</sup>, WU Di<sup>1</sup>, GUAN Panfeng<sup>2</sup>, ZHU Yeting<sup>3</sup>

(1. Shanghai Shentong Metro Co., Ltd., Shanghai 201103, China;

2. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China;

3. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200232, China)

**Abstract:** In view of the design requirements and potential risks of shield tail lengthening in the construction of synchronous shield tunnels, a three-dimensional finite element model of the shield shell is constructed to study the mechanical response of the shield shell structure under water and soil load based on a shield tunnel section project of the Shanghai Metro. The influence of shield tail length and overburden thickness on the stress and deformation of the shield shell is mainly discussed. The results indicate that the shield shell structure has sufficient strength and deformation margin under a design overburden thickness of 25m and a shield tail length of 3.65m. The maximum deformation and stress of the shield shell increase linearly with the length of the shield tail and increase nonlinearly with the depth of the overburden soil and are significantly affected by the initial geometric defects. To ensure that the maximum deformation of the shield tail is less than the minimum shield tail clearance under the shield pitching excavation, the design should comprehensively consider the buried depth change and the geometric initial defect, and the shield tail lengthening design should be carried out in a targeted manner.

**Keywords:** subways; shields; shield shell; shield tail; numerical simulation; stress; deformation

## 0 引言

盾构法应用规模持续扩大, 应用领域不断拓宽, 面临的地质和施工环境也日益复杂。在此背景下, 盾构施工装备设计也在不断地进行改进和创

\* 中国博士后基金面上项目(2024M762096); 上海市科技“启明星”计划(23QB1404200)

[作者简介] 姜海波, 工程师, 博士, E-mail: hypo\_jiang@163.com

[通信作者] 朱叶艇, 正高级工程师, Email: zhuyeting@stecmc.com

[收稿日期] 2025-07-26

新,以提高盾构施工效率、安全性和可靠性<sup>[1-2]</sup>。

在当前面临的一些特定工程或技术要求下,盾构机盾尾加长成为一种必要的设计调整,其中最为典型的当属盾构推拼同步技术的应用。盾构推拼同步技术利用推进油缸的行程富余量,在部分油缸回缩条件下进行管片拼装作业,实现了推进和拼装工序的“并联”,可提高盾构施工效率和经济性<sup>[3-4]</sup>。为了尽可能提高施工效率,需要在油缸行程富余量内完成多块管片的拼装,因此需适当加长油缸行程和盾尾长度。上海市域铁路机场联络线工程“骥跃号”推拼同步盾构机,相较于同标段且同直径的“骐跃号”常规盾构机,盾尾加长了300mm,施工效率提升约20%;受盾尾长度的限制,仍无法在推进油缸的最大行程内完成单环管片的拼装作业,出现停推拼装现象<sup>[5]</sup>。因此,如何在保证盾壳结构安全的前提下,进一步优化盾尾长度设计,提升推拼同步盾构机的作业效率,是当前亟待解决的问题。除盾构推拼同步技术外,一些特殊地质条件下需增设盾尾刷道数以提升密封性能,预埋承插式管片需要更大的管片拼装搭接空间,均存在加长盾尾的需求<sup>[6-8]</sup>。

盾尾内部为管片的拼装作业区,其内部无支撑梁加强结构,是盾壳中最薄弱的环节。盾尾加长增大了其在外荷载作用下产生大变形的风险,可能导致盾尾-管片间隙过小,管片无法正常拼装,甚至造成盾尾与已拼装管片接触,导致管片挤压破损、盾构卡住难以推进等问题<sup>[9]</sup>。因此,需要针对性地受力分析以指导盾尾加长设计。既有研究多通过有限元仿真对盾尾结构的强度和刚度进行校核,考虑几何初始缺陷、中空层合板结构、覆土厚度和壳体厚度等因素的影响<sup>[10-13]</sup>。然而截至目前,未见盾尾长度对盾壳结构受力影响的相关研究,且多数既有研究通过建立单独的盾尾模型分析结构的受力和变形行为,未充分考虑前盾和中盾的影响。

本文以上海地铁某盾构隧道区间工程为依托,采用ABAQUS有限元软件建立了外径6760mm的盾构机盾壳三维有限元模型,分析了盾壳在水土压力下的强度和变形稳定性,探讨了盾尾长度、覆土厚度和几何初始缺陷对盾壳应力与变形的影响。应当说明的是,盾尾加长设计除了应考虑其自身结构的受力和变形之外,还需考虑曲线段、俯仰段的盾尾间隙控制、盾尾密封和物料运输等问题,本文主要从盾壳结构受力的角度出发,为软土地层内推拼同步盾构机盾尾加长设

计提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 盾构机几何尺寸

本文以上海地铁某盾构隧道区间工程为依托,所用盾构机结构如图1所示,图1a展示了盾构整机结构,图1b展示了盾尾结构的几何尺寸。盾构机主要由前盾、中盾和盾尾三部分组成,其中前盾和中盾是安装刀盘驱动机构和推进油缸千斤顶的部位,其内部布置有大量的钢结构加强构件,而盾尾内部为管片拼装作业区,内部仅安装有3环剖面直径为30mm的盾尾刷固定环,用以安装钢丝刷和钢板刷。盾构机主要尺寸参数如表1所示。

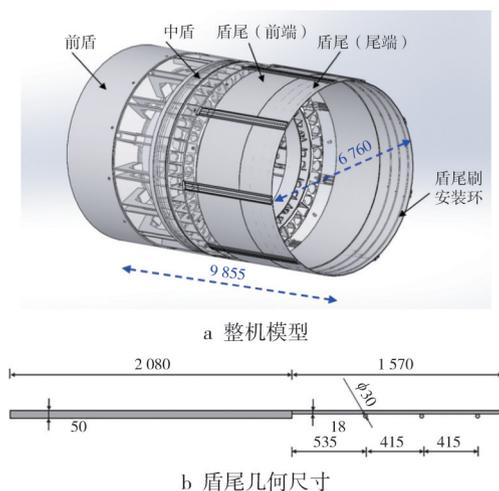


图1 盾构机结构

Fig. 1 Structure of shield machine

表1 盾构机主要尺寸参数

Table 1 Main dimensional parameters of shield machine

参数	取值/mm
盾构机外径	6 760
盾构机总长度	9 855
前盾长度	2 190
中盾长度	4 015
盾尾长度	3 650
盾尾长度(前端)	2 080
盾尾长度(后端)	1 570
盾尾结构厚度(前端)	50
盾尾结构厚度(后端)	18
盾尾加劲肋直径	30
盾尾间隙(盾尾端)	32

### 1.2 地层条件

该隧道区间主要位于④<sub>1</sub>淤泥质黏土、⑤<sub>1</sub>黏土和⑥<sub>1</sub>粉质黏土,区间长度约3500m,隧道纵坡为“W”字坡,最大坡度为25‰,最小曲线半径R=500m,覆土厚度10.6~20.4m。纵向地质剖面如图2所示,各土层的物理力学参数如表2所示。

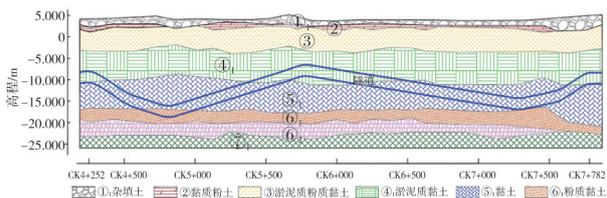


图 2 盾构区间纵断面地质剖面

Fig. 2 Longitudinal soil profile along the tunnel

表 2 土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil strata

层号	名称	层厚/ m	重度/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
②	黏质粉土	0.5~1.8	18.0	7.3	28.5
③	淤泥质粉质黏土	4.9~6.5	18.0	13.0	25.0
④ <sub>1</sub>	淤泥质黏土	6.9~8.4	16.8	14.0	12.0
⑤ <sub>1</sub>	黏土	6.9~11.4	17.3	16.3	15.7
⑥ <sub>1</sub>	粉质黏土	2.0~4.5	19.0	26.0	18.6

## 2 盾壳整机有限元计算模型

### 2.1 模型建立

盾尾是盾构机盾壳中的薄弱环节,以往针对盾壳结构受力性能分析的研究主要关注盾尾,因此大多建立盾尾模型而非盾壳整机模型<sup>[10-13]</sup>。然而,盾壳整机模型能更加真实地模拟盾尾与中盾的接触关系,同时考虑前盾和中盾在外荷载下的变形。因此,本文通过建立盾壳整机模型进行分析计算。

前盾与中盾相较盾尾的整体刚度更大,其盾壳在水土压力下的变形风险较小。为了在建立数值模型时提升计算效率,对前盾和中盾模型进行了简化处理,保留盾壳和主要支撑结构,忽略了小半径圆角、倒角、螺栓孔以及螺栓等细微构造。不考虑焊接处材料特性的变化,通过绑定约束来模拟前盾与中盾、中盾与盾尾,以及盾尾与加劲肋之间的接触关系。盾尾刷和密封油脂压力在一定程度上能够抑制盾尾尾端变形,计算中考虑盾尾刷-密封油脂复合体的影响。建立的盾壳整机数值模型如图 3 所示。盾壳通过 4 节点曲壳单元模拟,前盾和中盾内部的钢结构加强构件通过 8 节点六面体线性减缩积分实体单元模拟,盾尾处的 3 圈加劲肋通过梁单元模拟。网格近似全局尺寸为 100mm。分析步控制中打开几何非线性,以考虑大变形引起的附加作用。

盾壳、钢结构加强构件和加劲肋均为 Q355 钢材,采用理想弹塑性本构模拟,弹性模量取 206 000MPa,泊松比取 0.3,屈服强度 355MPa。

### 2.2 荷载模式及边界条件

采用荷载-结构模型,作用于盾壳的荷载如图 4

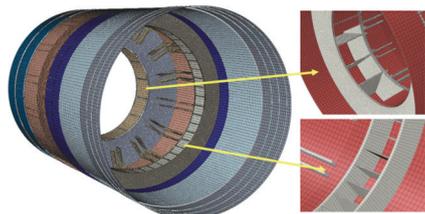


图 3 盾壳整机有限元模型

Fig. 3 Finite element model of shield shell of shield machine

所示,包括水土压力、结构自重、地层抗力、盾尾刷-密封油脂复合压力。地层抗力采用接地弹簧模拟,结合上海工程经验与日本盾构标准规范衬砌计算中的建议,地层抗力系数取  $5\ 000kN/m^3$ ,只考虑受压区抗力。参考 Ye 等<sup>[14]</sup>的做法,将盾尾刷-油脂复合体作用于盾壳的力简化为沿周向均匀分布,如图 4b 所示。根据以往对盾尾刷荷载与油脂压力的研究<sup>[14-17]</sup>,将盾尾刷-油脂对盾壳的作用力设定为 200kPa。本文主要研究直线掘进情况下盾尾的受力和变形,故暂不考虑盾构掘进转向荷载。

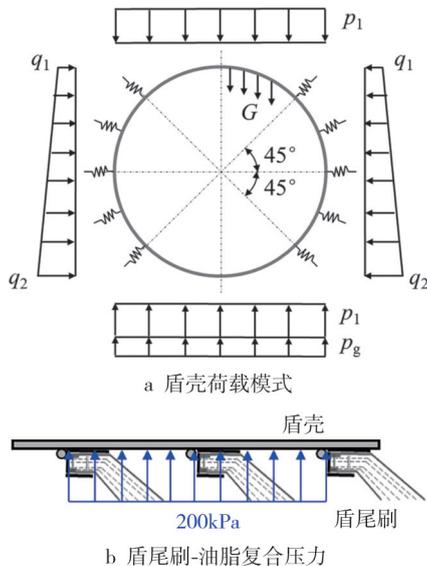


图 4 作用于盾壳的荷载

Fig. 4 Load acting on shield shell

由表 2 中的土层物理力学参数可知,各土层标贯击数均  $\leq 4$ ,为较软的黏性土,根据 GB/T 51438—2021《盾构隧道工程设计标准》要求,采用全覆土压力作为盾构顶部的水土压力计算值,采用水土合算,这一处理方式亦符合上海地区工程经验<sup>[13]</sup>。取一般覆土和深覆土的分界点 25m 为计算覆土厚度。综合考虑表 2 中的土层物理力学参数,将各土层简化为单一性质土层,重度取  $18kN/m^3$ ,根据日本盾构标准规范给出的数据侧向压力系数取 0.7。各项荷载值计算过程如下:

$$p_1 = \gamma H \quad (1)$$

$$q_1 = p_1 \lambda \quad (2)$$

$$q_2 = (p_1 + \gamma D) \lambda \quad (3)$$

$$p_g = W/S \quad (4)$$

式中: $p_1$ 为盾构顶部的覆土压力; $q_1$ 为盾构顶部受到的侧向土压力; $q_2$ 为盾构底部受到的侧向土压力; $p_g$ 为盾构自重反力; $D$ 为盾构外径; $W$ 为盾构重力; $S$ 为盾构的水平投影面积。最终确定盾壳外荷载取值如表3所示。

表3 盾壳外荷载取值

Table 3 Value of external load acting on shield shell

荷载	$p_1$	$p_g$	$q_1$	$q_2$
取值/kPa	450	22	315	400

边界约束设定如图5所示,将前盾刀盘外圈设置为约束端,约束 $z$ 方向的平动自由度,同时限制约束顶端、底点 $x$ 方向的平动自由度,限制约束端拱腰两顶点 $y$ 方向的平动自由度,由此完全限制了模型的刚体位移,且最大程度允许了盾壳在外荷载下的变形。

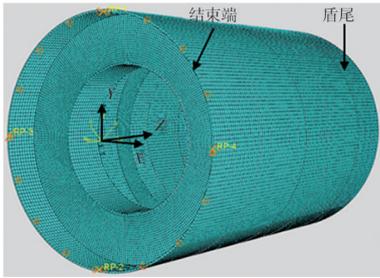


图5 模型边界条件

Fig. 5 Boundary conditions of model

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 理想结构模型的典型计算结果

在不考虑结构几何初始缺陷的条件下,盾壳变形和应力计算结果如图6所示。由图6a可知,盾壳最大变形产生于盾尾的悬臂端,盾尾变形整体呈横鸭蛋趋势;盾尾最大变形为6.17mm,产生于拱顶悬臂端,变形径向向内,远小于盾尾间隙(32mm);两侧拱腰的最大变形为2.07mm,变形径向向外。由图6b可知,盾壳的最大应力为75.17MPa,产生于拱顶,远小于屈服应力(355MPa)。因此,在设计覆土厚度(25m)和盾尾长度(3.65m)下,无几何初始缺陷的盾壳结构有充足的强度和变形裕量。

为了验证计算结果的可靠性,与实测数据进行对比。测量了上海某隧道区间的实际盾尾间隙和成型隧道内径,如图7所示,将盾尾间隙、隧道竖向内径和管片厚度求和得到盾尾前端和盾尾后端交

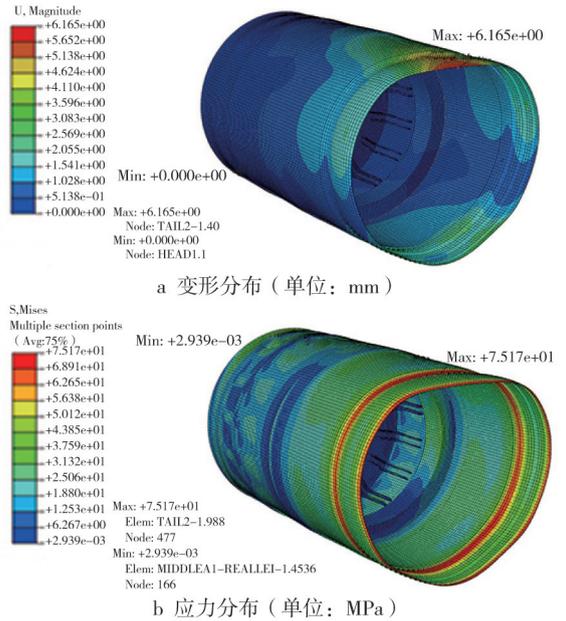


图6 理想盾壳结构的变形和应力

Fig. 6 Deformation and stress of the ideal shield shell

界处的盾壳竖向内径,其与设计内径差值即为盾壳的竖向收敛变形值。在15m埋深下,统计了5环测试结果,获得盾壳的竖向收敛变形均值为2mm。同样在15m埋深荷载下,模型计算的盾尾前端和后端交界处的盾壳竖向收敛为1.72mm,实测和计算差值仅0.28mm。

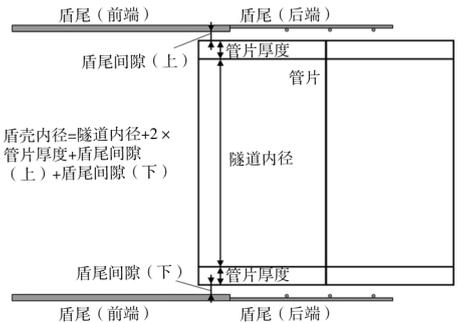


图7 盾壳竖向内径计算

Fig. 7 Inner vertical diameter calculation of shield shell

#### 3.2 盾尾加长和覆土厚度变化的影响分析

为分析盾尾加长的可行性,探究了不同盾尾长度下的盾壳受力和变形行为。初始盾尾长度为3.65m,其中盾尾前端长2.08m,盾尾尾端长1.57m。盾尾前端壁厚较大,出于安全考虑,加长盾尾前端,而盾尾后端长度保持不变,这也是既有盾尾加长设计的做法<sup>[5-8]</sup>。此外,由于隧道沿线覆土厚度不是定值,本节在探讨盾尾加长影响的同时考虑了覆土厚度变化。考虑到上海地层以软土为主,即使埋深达到40m,仍采用全覆土压力作为盾构顶部的水土压力计算值<sup>[13]</sup>。值得说明的是,采用全覆土压力是

偏安全的做法,若面临覆土厚度较大且覆土具有一定强度的情况,也可采用松弛土压力作为盾构顶部的水土压力计算值。

盾尾加长和埋深变化对盾壳结构最大变形、应力的影响如图8所示。由图8可知,盾壳结构的最大变形和最大应力随盾尾长度的增大线性增大,随覆土深度的增大非线性增大。设计覆土厚度下(25m),当盾尾增长至1200mm时,盾壳最大变形达到10.16mm且最大应力达到79.03MPa,相较未加长结构分别增大了65.04%和5.14%。设计盾尾长度下(3.65m),当覆土厚度达到40m时,盾壳最大变形达到15.62mm且最大应力达到216.7MPa,相较设计覆土厚度下分别增大了153.74%和188.28%。当盾尾加长1200mm且覆土厚度达到40m时,盾壳最大变形达到27.87mm且最大应力达到241.04MPa,相较设计覆土厚度和盾尾长度下分别增大了352.78%和220.66%。

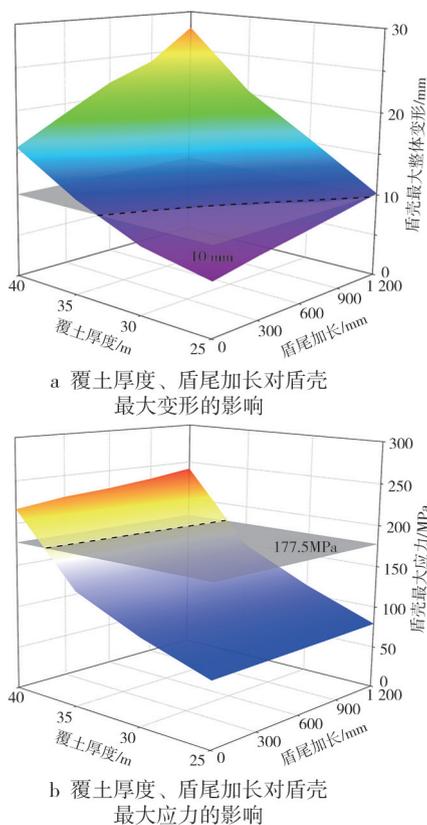


图8 覆土厚度和盾尾长度对盾壳最大变形和应力的影响

Fig. 8 Influence of buried depth and shield tail length on the deformation and stress of shield shell

由图6可知,盾尾最大变形出现在拱顶区域,且变形径向向内。在这一变形特征下,若盾构机处于仰角掘进过程中,即使盾尾变形未超过设计盾尾间隙,仍可能发生盾尾和管片的运动干涉。例如,对

于环宽1.2m的盾构管片,当盾构机俯角达到20%时,最小盾尾间隙将比初始状态减小约22mm<sup>[18]</sup>。在本文所讨论的初始盾尾间隙为32mm的条件下,这意味着盾尾变形的允许值只剩下10mm。由图8a可知,在多种盾尾加长及覆土厚度组合下,盾尾变形均可能超过特定工况下的盾尾间隙。与此同时,盾壳最大应力也有相应的允许值;考虑到Q355钢的屈服极限为355MPa,若取安全系数为2,可得盾壳的最大应力不应超过177.5MPa。由图8b可知,盾尾应力同样存在超过允许值的可能。因此,设计上应综合考虑埋深变化、盾构俯仰姿态变化和应力安全系数,针对性地进行盾尾加长设计,以确保盾尾的变形和盾壳的最大应力均能够控制在允许范围内。

### 3.3 考虑几何初始缺陷模型的典型计算结果

由于制造误差,盾壳结构可能存在一定的几何初始缺陷,使得结构稳定承载能力的理论和实际值存在差异。因此,有必要考虑几何初始缺陷,对盾壳结构的受力和变形进行更细致的分析。盾壳可能发生的失稳类型为极值点失稳<sup>[12-13]</sup>。在ABAQUS中进行屈曲分析,得到前10阶屈曲模态中的3类典型屈曲形态,如图9所示。第1阶屈曲模态为盾尾悬臂端拱底局部屈曲,第4阶屈曲模态为盾尾悬臂端拱顶局部屈曲,第9阶屈曲模态为盾尾悬臂端两侧拱腰及拱底多处局部屈曲。



图9 典型的盾壳屈曲模态

Fig. 9 Typical types of shield shell buckling modes

随后,开展非线性屈曲分析,将上述3类典型屈曲模态的节点位移视为几何初始缺陷,通过修改ABAQUS的关键词文档引入计算模型,重新施加荷载进行几何非线性求解。基于德国规范(DASt-Richtlinie 017)对钢结构的制造误差要求,设定盾壳的几何初始缺陷为3.75mm。计算得到的盾壳变形形态与屈曲模态一致。在第1种几何初始缺陷条件下,最大变形7.79mm产生于拱底,变形径向向内,最大应力124.9MPa同样产生于临近拱底区域。在第2种几何初始缺陷情况下,最大变形11.82mm产生于临近拱顶区域,变形径向向内,最大应力125.6MPa同样产生于临近拱顶区域。在第3种几

何初始缺陷情况下,最大变形 6.62mm 产生于临近拱顶区域,变形径向向内,最大应力 108.0MPa 产生于临近拱底区域。由此可知,第 2 类几何初始缺陷对盾壳结构的受力性能影响较大;相较于理想结构,在第 2 类几何初始缺陷下,盾壳的最大变形提高了 91.57%,最大应力提高了 67.09%。

在考虑第 2 类结构几何初始缺陷的情况下,尽管盾壳最大变形仍小于盾尾间隙(32mm)且结构未达到屈服,但此时的盾尾间隙可能已无法满足特定掘进工况下的最小盾尾间隙要求,如 3.2 节中讨论的盾构机俯角达到 20‰的情况。因此,在盾壳结构设计和制造时,应尽可能地避免结构存在几何初始缺陷,或是在拱顶局部采用更高强度钢材、增大截面尺寸;在此基础上,才可进一步讨论盾尾加长设计的可能性。

#### 4 结语

以上海地铁某盾构隧道区间工程为背景,建立了外径 6 760mm 的盾构机盾壳三维有限元模型,分析了盾壳在水土压力下的强度和变形稳定性,探讨了几何初始缺陷、盾尾长度和覆土厚度等因素对盾壳应力与变形的影响,得出以下结论。

1)在设计覆土厚度和盾尾长度下,理想盾壳结构的最大变形为 6.17mm,产生于拱顶悬臂端,最大应力为 75.17MPa,同样产生于拱顶区域,最大变形远小于盾尾间隙(32mm)且最大应力远小于屈服应力(355MPa)。

2)在本文关注的盾尾长度和覆土深度范围内,盾壳最大变形和应力随盾尾长度的增大线性增大,随覆土深度的增大非线性增大;当覆土厚度达到 40m 且盾尾加长 1 200mm 时,盾壳最大变形达到 27.87mm 且最大应力达到 241.04MPa,尽管仍小于盾尾间隙(32mm)和 Q355 钢的屈服应力(355MPa),但可能已经超过盾构机在俯仰掘进过程中的变形允许值、特定安全系数下的应力允许值;设计上应综合考虑埋深变化、盾构俯仰姿态变化和应力安全系数,针对性地进行盾尾加长设计。

3)在设计覆土厚度和盾尾长度条件下,考虑几何初始缺陷计算得到盾壳最大变形可达 11.82mm,最大应力可达 125.6MPa,产生于临近拱顶区域,相较于理想结构分别提高了 91.57%和 67.09%;在盾壳结构设计和制造过程中,应尽可能地降低制造误差,或是在拱顶局部采用更高强度钢材、增大截面尺寸。

4)后续研究可考虑盾尾同步注浆、偏压效应、盾壳-土体摩擦等因素,进行更加精细化的数值模拟,开展更为深入的盾壳受力性能探究。

#### 参考文献:

- [1] 何川,封坤,方勇.盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J].西南交通大学学报,2015,50(1):97-109.  
HE C, FENG K, FANG Y. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97-109.
- [2] 易国良,陈馈,卢高明,等.我国城市地下空间盾构法隧道工程技术新进展[J].隧道建设(中英文),2024,44(1):1-20.  
YI G L, CHEN K, LU G M, et al. New progress of shield tunneling technology in urban underground space in China[J]. Tunnel construction, 2024, 44(1): 1-20.
- [3] 朱叶艇,闵锐,秦元,等.盾构推拼同步技术模型试验平台的研发及应用[J].上海交通大学学报,2022,56(7):897-907.  
ZHU Y T, MIN R, QIN Y, et al. Development and application of a model test platform of synchronous technology combining shield tunneling with segment assembling[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(7): 897-907.
- [4] 朱叶艇.基于同块同压原则的盾构推拼同步技术模型试验研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(5):854-862.  
ZHU Y T. Model test verification of synchronous technology combining shield tunneling with segment assembling based on principle of uniform loading on a single segment[J]. Tunnel construction, 2022, 42(5): 854-862.
- [5] 朱叶艇,翟一欣,闵锐,等.盾构推拼同步顶力重分配分区数量试验比选[J].地下空间与工程学报,2022,18(S2):702-713,736.  
ZHU Y T, ZHAI Y X, MIN R, et al. Comparison and selection of the number of divisions for shield push-and-push synchronous jacking force redistribution[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2022, 18(S2): 702-713, 736.
- [6] 李勇军.盾尾密封全过程管理要点与实践[J].隧道建设(中英文),2022,42(5):900-906.  
LI Y J. Key points and practice of entire process management of shield tail seals[J]. Tunnel construction, 2022, 42(5): 900-906.
- [7] 赵驰,梁红兵,林祺涵.小半径加长盾构始发技术在球状风化体岩层中的应用研究[J].广州建筑,2020,48(6):27-32.  
ZHAO C, LIANG H B, LIN Q H. Research on initiation technology of small and medium radius extended shield in spheroidal weathering mass[J]. Guangzhou architecture, 2020, 48(6): 27-32.
- [8] 毕湘利.上海轨道交通提升盾构隧道结构本质安全的创新实践[J].城市轨道交通研究,2024,27(1):1-5.  
BI X L. Innovative practices in enhancing the inherent safety of shield tunnel structures in Shanghai rail transit[J]. Urban mass transit, 2024, 27(1): 1-5.
- [9] VANDERVLIEET C, BIJLAARD F, KOOIJMAN G, et al. Shield tail deformations: experience, mechanics, and lessons [C]// Vancouver: World Tunnel Congress, 2009.
- [10] 王小盾,王炳彦,黄德中,等.类矩形盾尾受力性能数值模拟研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(9):1463-1470.  
WANG X D, WANG B Y, HUANG D Z, et al. Numerical simulation of mechanical properties of quasi-rectangular shield tail[J]. Tunnel construction, 2018, 38(9): 1463-1470.

- ZHANG G Q, YANG X Z, LEI J S, et al. Study on safety analysis of adjacent operation tunnel under blasting load[J]. Construction technology, 2025, 54(1): 39-45.
- [ 3 ] 王正庆, 郭运华, 王明明, 等. 上软下硬复合地层大断面隧道爆破施工的安全控制分析[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(11): 14-18.
- WANG Z Q, GUO Y H, WANG M M, et al. Blasting safety control of large section tunnel in upper soft and lower hard composite strata[J]. Construction technology, 2025, 54(11): 14-18.
- [ 4 ] 黄浩, 汪海波, 来永辉, 等. 硬岩隧洞下穿高速公路爆破方案与振动特征分析[J]. 煤矿爆破, 2024, 42(3): 16-20.
- HUANG H, WANG H B, LAI Y H, et al. Blasting scheme and vibration characterization analysis of hardrock tunnel underpass expressway[J]. Coal mine blasting, 2024, 42(3): 16-20.
- [ 5 ] 韩文抢, 王熙辰, 夏裕栋, 等. 双洞隧道近距离下穿既有引水隧洞爆破开挖安全控制研究[J]. 工程爆破, 2025, 31(1): 148-155.
- HAN W Q, WANG X C, XIA Y D, et al. Safety control study on blasting excavation of double tunnel under existing water diversion tunnel in close proximity[J]. Engineering blasting, 2025, 31(1): 148-155.
- [ 6 ] 刘杨, 邵泽楷, 田浩帆, 等. 高速公路隧道下穿房柱式煤矿采空区爆破施工煤柱损伤规律研究[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(4): 132-144.
- LIU Y, SHAO Z K, TIAN H F, et al. Damage mechanisms of coal pillars induced by blasting construction in highway tunnels underlying room-and-pillar mine goafs[J]. Modern tunnelling technology, 2025, 62(4): 132-144.
- [ 7 ] 贾家银, 曹贞洋, 周世均, 等. 近距离下穿既有隧道的地下爆破振动控制技术[J]. 爆破, 2025, 42(2): 167-177.
- JIA J Y, CAO Z Y, ZHOU S J, et al. Suppression techniques for close proximity undercrossing of existing tunnels blasting[J]. Blasting, 2025, 42(2): 167-177.
- [ 8 ] WANG Y, GAO T Y, WANG R, et al. Study on the mutual interference and propagation characteristics of three-dimensional vibration during shield tunnel construction in hard rock strata[J]. Scientific reports, 2025, 15(1): 14875.
- [ 9 ] 于咏妍, 高永涛. 钻爆法地铁隧道开挖对地下管线的影响[J]. 工程爆破, 2015, 21(4): 6-10.
- YU Y Y, GAO Y T. Effect of subway tunnel excavation by drill-blasting method on pipeline[J]. Engineering blasting, 2015, 21(4): 6-10.
- [ 10 ] 费鸿禄, 吕金齐, 刘梦, 等. 新建隧道上跨既有隧道爆破振动响应研究[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 54-58.
- FEI H L, LÜ J Q, LIU M, et al. Study on blasting vibration response of the existing tunnel crossing the new tunnel[J]. Engineering blasting, 2017, 23(4): 54-58.
- (上接第 61 页)
- [ 11 ] 邓宏光, 游思坤, 邓武, 等. 基于 ANSYS 的盾尾有限元分析[J]. 机械, 2005, 32(5): 7-9.
- DENG H G, YOU S K, DENG W, et al. Finite element analysis on the rear part of TBM based on ANSYS[J]. Machinery, 2005, 32(5): 7-9.
- [ 12 ] 何於琰. 有限元分析在盾构掘进机壳体设计中的应用[J]. 隧道建设, 2006, 26(2): 79-81, 86.
- HE Y L. Application of finite element analysis in design of shells of shield tunnel boring machines[J]. Tunnel construction, 2006, 26(2): 79-81, 86.
- [ 13 ] 张雪辉, 白云, 徐晓扉, 等. 大深度超大直径盾构盾尾受力性能探究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 100-106.
- ZHANG X H, BAI Y, XU X F, et al. Mechanical property analysis of super-large-diameter shield tailskin under deep ground load[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2017, 13(S1): 100-106.
- [ 14 ] YE F, FENG H L, HAN X B, et al. Mechanism and preventive measures of slurry leakage at shield tail brushes under abnormal shutdown condition—a case study[J]. Underground space, 2023, 8: 144-161.
- [ 15 ] YE G L, HAN L, YADAV S K, et al. Investigation on the tail brush induced loads upon segmental lining of a shield tunnel with small overburden[J]. Tunnelling and underground space technology, 2020, 97: 103283.
- [ 16 ] 秦楠, 单晓波, 武文清, 等. 盾构隧道施工期管片衬砌外荷载特征分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(5): 2229-2241.
- QIN N, SHAN X B, WU W Q, et al. Analysis of external load characteristics of segment lining during construction period of shield tunnel[J]. Journal of railway science and engineering, 2025, 22(5): 2229-2241.
- [ 17 ] 杨兴亚, 苏志学, 贺开伟, 等. 盾构盾尾密封承压能力研究与试验[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(12): 2036-2045.
- YANG X Y, SU Z X, HE K W, et al. Pressure bearing capacity of shield tail seal[J]. Tunnel construction, 2023, 43(12): 2036-2045.
- [ 18 ] 于万友. 盾尾间隙控制分析[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(3): 47-53.
- YU W Y. Analysis of shield tail clearance control[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(3): 47-53.