

小半径曲线盾构法隧道钢管片囊袋工艺研究与应用

吕 敏

(上海隧道工程有限公司,上海市 200032)

摘 要: 小半径曲线隧道在大城市中得到广泛的应用,但小半径曲线隧道转弯时形成的法向分力对隧道造成极大的安全隐患。提出一种新型钢管片囊袋,在管片脱出盾尾后,通过钢管片囊袋定向注浆,并快速固化,填充盾尾间隙,为盾构隧道掘进提供反力,提高隧道成型质量和安全性。首先通过试验完成钢管片囊袋材质和保护钢板选型,然后通过功能试验和足尺试验对设计钢管片囊袋使用性能进行验证。结果表明,通过囊袋结构、材料、保护钢板等的设计和优化,可以满足小半径曲线隧道施工中转弯功能需求。

关键词: 小半径隧道;钢管片;囊袋;盾构法

中图分类号: U455.43

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0232-06

Research and Application of Steel Pipe Segment Bagging Technology for Small-Radius Curved Shield Tunnel

LYU Min

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Small-radius curved tunnels are widely used in large cities. The normal force generated when a small-radius curved tunnel turns poses significant safety risks to the tunnel. A new type of steel pipe segment bag, after the segments are removed from the tail of the shield, is used for directional grouting, and quickly solidifies to fill the gap at the tail of the shield, which provides the reaction force for the tunneling of shield tunnels and improves the quality and safety of tunnel formation. Firstly, the selection of the steel pipe segment bag material and the protective steel plate is completed through experiments, and then the application performance of the designed steel pipe segment bag is verified through the functional tests and full-scale tests. The results show that the design and optimization of the bag structure, materials and protective steel plate can meet the turning functionality requirements for the construction of small-radius curved tunnel.

Keywords: small-radius tunnel; steel segment; bag; shield tunneling method

0 引 言

随着城市化进程推进,地下空间利用成为解决“大城市病”的“一剂良药”。盾构法施工作为地下空间施工成隧、成管最便捷有效的手段,具备安全开挖、掘进速度快等优点。然而,对于小半径曲线隧道而言仍存在转向不易,需要大半径曲线转向,对成隧成管的轴线线形有很大的限制^[1-3]。因此,通常采用增加中间工作井即中继井的方式解决小半径隧道转弯问题。然而,鉴于城市的不断扩张与发展,中继井的选址与建设变得越来越困难^[4-7]。

前期研究,如张宝玉等主要通过盾构机改造调整、管片分块设计、隧道注浆等措施实现直径 11.97 m

隧道小半径 450 m 的转弯;温竹茵等主要从盾构机设备选型、管片尺寸设计、隧道施工工艺等采取措施,顺利实现直径 15 m 隧道小半径 600 m 的转弯;黄炜焱等从盾构机选型、管片拼装、施工工艺控制等方面出发,成功实现半径 6.2 m 小隧道极小半径 250 m 的转弯。可以发现,隧道施工中,以往方法虽然可以实现隧道小半径转弯,但对盾构设备、管片设计、施工工法等要求较高,而且均不具有多工程普适性,综合施工成本大^[8-10]。

针对以上情况,基于刚度较大的钢管片结构,通过小半径曲线隧道施工工艺研发减少中继井数量,已成为一种经济且有效的提高隧道施工效率、降低施工成本的共识^[11-15]。小半径曲线隧道施工中,隧道转弯处管片容易与盾尾壳体发生碰擦,以及在法向力作用下管片易发生碎裂、错台,是小半径曲线隧道施工中直接面临的问题^[16-17]。在此背景下,文章

收稿日期: 2025-01-10

作者简介: 吕敏(1985—),男,本科,工程师,从事市政构件研究及应用工作。

设计一种钢管片囊袋,即在钢管片外弧面与盾尾间布置囊袋,通过向囊袋中定向注浆填补盾尾间隙,为盾构掘进提供反力,对适应小半径曲线盾构法施工的钢管片进行了相应的尝试研究。

1 小半径曲线段钢管片囊袋设计

以桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程 TP1.4 标段为例,盾构隧道外径 $\phi 4\,700\text{ mm}$,内径 $\phi 4\,000\text{ mm}$,管片 6 分块布置,错缝拼装。如图 1 所示,隧道总推进长度约 3 198.5 m,设置有 R65 m、R70 m、R75 m、R80 m 四处极小半径曲线段。由以上分析可知,极小半径曲线段隧道转弯将给盾构施工带来挑战。



图 1 桃浦 1.4 标工程总体平面示意图

隧道推进时,通过油缸将荷载顶推到管片上。如图 2 所示,可见小半径曲线隧道转弯时,隧道轴线为非直线状态,推进荷载除沿隧道轴线方向与管片产生反力抵消外,同时沿轴线法线方向产生一个法向分力^[18-19]。管片出盾尾后,受推进油缸法向分力的作用,隧道存在向转向方向外侧偏移的趋势。法向分力除与盾构机油缸推力成正比外,也与管片隧道转弯半径有关,半径越小,法向分力越大。小半径曲线隧道施工中,采取措施抵消或削弱法向分力是控制隧道成型最有效的方式。

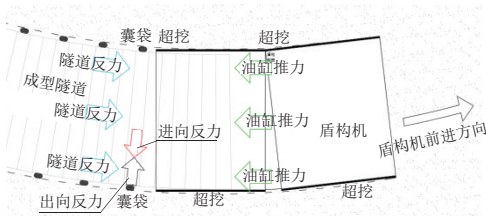


图 2 小半径曲线隧道推进结构示意图

桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程 TP1.4 标项目中,按 1/2~1/3 的比例设计钢管片囊袋。钢管片囊袋脱出盾尾两环后,基于小半径曲线隧道需要对囊袋进行注浆,迅速形成可控的环状或月牙状囊袋结构,以填充管片与土体间的间隙,进而将隧道箍紧在目标轴线土体中,减少因法向分力对隧道轴线造成

的不利影响。

项目中,隧道覆土深度约 40 m,静止侧压力约 0.5 MPa,囊袋注浆压力设计为 1.0 MPa。囊袋袋体承受压力差约为 0.5 MPa。小半径曲线隧道施工中,盾构机转向及纠偏要求对土体进行超挖,则管片外弧面与盾构机刀盘切削层间存在超挖间隙。其中,当管片外径为 4 660 mm,盾构机刀盘为 4 910 mm 时,直线段隧道中单侧盾尾间隙约为 125 mm,小半径曲线隧道施工时存在约 35 mm 的超挖量,则管片与土体间隙为 160 mm。考虑到盾构轴线与隧道轴线之间存在偏差,囊袋极限打开高度 D 设计为间隙的 150%,即 240 mm(自管片外弧面开始量起),图 3 所示为囊袋打开示意图。

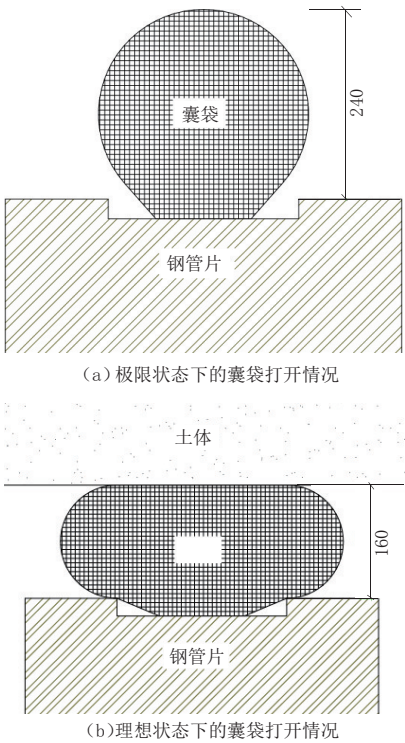


图 3 极限状态及理想状态下的囊袋打开情况(单位:mm)

另外,设计囊袋仓用来固定囊袋,囊袋折叠后内置于囊袋仓内,囊袋仓内置于钢管片外弧面。分析发现,囊袋仓太大会影响钢管片结构与强度,所以囊袋仓应在满足基本功能的前提下尺寸尽量小型化。工作时,向囊袋内注浆,在注浆压力作用下囊袋仓膨胀打开。此外,为防止囊袋因经过盾尾时与盾尾刷摩擦发生破坏,在囊袋外侧专门设计有可单向打开的保护层结构。

2 钢管片囊袋试验

2.1 囊袋材质选择与尺寸设计

由以上可知,钢管片囊袋打开后位于管片与土

体之间,承受盾构轴线方向巨大的剪切分力。因此,囊袋自身材料及其性能对小半径盾构隧道转弯具有极大的影响。囊袋材质选择时,基于施工性能和承载压力两个指标展开。以下对 4 种常用材料:芳纶纤维、涤纶长丝、橡胶、PVC,通过注浆试验对囊袋材料进行考察和选择。

注浆试验,通过注浆泵将准备好的注浆液注入几种材质注浆袋中,观察几种注浆袋在注浆过程中的变化情况。注浆袋压力注浆试验,注浆袋结构露天放置,计算注浆袋的额定注浆量,将注浆管与注浆袋连接后注浆,注浆压力控制为 0.1 MPa,模拟在无外压的情况下注浆袋的注浆状态。其中,注浆液的水灰比为 0.6,水泥浆与水玻璃的体积比为 7:3。

通过注浆试验,对几种材质注浆袋在实际施工中的注浆效果和性能表现、结构的可靠性和稳定性,以及注浆袋材料选择进行初步评估。

图 4 所示为囊袋材质试验结果比对,表 1 所示为囊袋材质试验结果统计。现场评估认为,如图 4(a)所示,橡胶囊袋因折叠性能差,折叠后尺寸太大难以放进存储仓,实际使用困难,故未进行本次注浆试验。结果表明,布料类材质较 PVC 及橡胶类材质折叠性能好,PVC 及橡胶材质无法同时满足折叠的施工性能和注浆压力的需求。两种布料材质中,涤纶长丝与芳纶纤维折叠性能相当,但注浆加压后,芳纶纤维无法达到预期的包裹浆液的需求。然而,涤纶长丝则可以实现包裹浆液,同时加压破坏荷载达到 1.5 MPa,即满足加压的需求,而且加压后囊袋袋体有略微的膨胀。美中不足的是,袋体厚度较厚,厚度约 5 mm。

基于设计囊袋极限打开高度,囊袋宽度约: $D \times \pi / (\alpha \times 2) = 240 \times 3.14 / (1.065 \times 2) = 354$ mm,试验囊袋尺

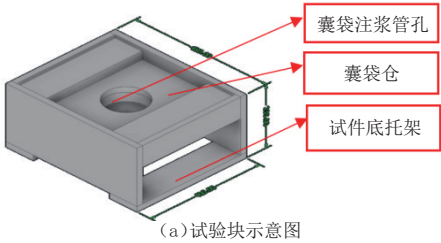


图4 不同材质囊袋试验结果比对

表 1 囊袋材质试验结果统计

材质	材质试验 囊袋尺寸 直径/长度/壁厚/ mm	施工性能	注浆加压 破坏荷 载/MPa	加压后的 直径膨胀 率 $\alpha=D_1/D_0$ %
芳纶 纤维	200/500/3	注浆填满后,浆液从孔隙间流出,无法稳压,折叠性好	未达到稳压状态	未膨胀
涤纶 长丝	150/500/5	注浆填满后,空气从孔隙间排出,囊袋表面泛潮但不漏水,折叠性好	1.5	106.5
PVC	400/600/1	密封性好,折叠性能一般	0.6	110
橡胶	300/500/7	密封性好,折叠性能较差,无法满足储存在囊袋仓的需求		未测试

寸为 350 mm×420 mm,折叠后厚度约 25~30 mm。囊袋折叠放入到尺寸为 240 mm×430 mm×30 mm 的囊袋仓中。图 5 所示为囊袋及囊袋仓示意图。此外,由于受土体覆盖,难以直接观察到囊袋实时打开状态,施工中可以通过注浆压力及注浆量进行注浆控制。而且,在满足注浆压力的前提下,设备选型时应重点关注注浆设备的注浆流量参数变化。



(a) 试验块示意图



(b) 囊袋试验件实装图

图5 囊袋及囊袋仓示意图

2.2 囊袋保护钢板设计

为保证囊袋能顺利通过盾尾刷,同时免遭因接触盾尾刷产生摩擦破坏,避免盾尾油脂流失,在囊袋上方两侧设计安装有相互交叠的保护钢板。囊袋保护钢板,需要具有足够的强度和良好的弹性,以确保囊袋在划过盾尾刷时免遭破坏,同时注浆后能迅速弹开。经过调研,弹簧钢板和普通钢板具有较强的强度和弹性。以下分别通过带 2 种钢板的试件模拟

囊袋过盾尾刷弹开试验(见图6),对2种钢板的性能进行验证。

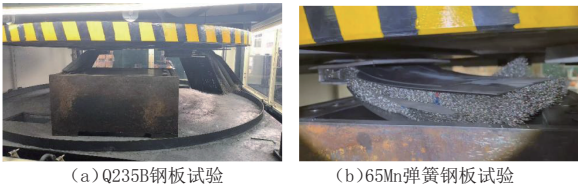


图6 保护钢板过盾尾刷试验照片

表2 保护钢板过盾尾刷试验材料及结果

材质	厚度	试验结果
65Mn 弹簧钢板	0.6 mm	囊袋位置略有下凹,但能重复平滑通过,通过后钢板恢复平直
Q235B 钢板	4 mm	囊袋位置无变形,重复平滑通过

(1)65Mn 弹簧钢板保护的囊袋注浆打开试验

如图7所示,试验用65Mn 弹簧钢板,弹簧钢板厚度为0.6 mm。试验中,根据要求钢板采用双面交叉叠合,分两层保护的形式。加压填充材料为膨润土,设计加载压力 ≥ 0.5 MPa。



图7 65Mn 弹簧钢板保护的囊袋注浆打开试验过程照片

试验分为4个阶段:一是开始阶段:填充开始,填充膨润土开始注入囊袋,囊袋开始充盈,但表面无明显变化,压力表示数为零;二是中间阶段1:囊袋继续充盈,表面快速鼓起,压力表示数为零,65Mn 弹簧钢板依然压覆在囊袋上;三是中间阶段2:囊袋充盈速度减慢,压力表示数开始上升,在压力表示数达到0.4~0.5 MPa左右时,65Mn 弹簧钢板完全打开;四是终止阶段:囊袋膨胀终止,压力表示数在0.5~0.6 MPa。试验加压至囊袋破裂,此时压力值达到约0.6 MPa,囊袋接缝针线缝合处破裂。膨润土溢出,试验结束。

(2)Q235B 钢板保护的囊袋注浆打开试验

如图8所示,试验采用Q235B 钢板,钢板厚度为



图8 Q235B 钢板保护的囊袋注浆打开试验过程照片

4 mm。试验中,钢板仍采用双面交叉叠合形式,分两层布置。加压填充材料为膨润土,设计加载压力 ≥ 0.5 MPa。

试验中,下层钢板受囊袋挤压开始变形,但无法有效打开。试验加压至0.6 MPa时,囊袋接缝针线缝合处出现破裂,膨润土溢出,试验终止。最终,囊袋拱起高达50~60 mm,囊袋并未打开。

综上,囊袋保护材料打开试验表明,65Mn 弹簧钢板较Q235B 钢板具备更好的打开性能。可以预测,Q235B 钢板通过尺寸、厚度等的再优化,在相同外侧土体条件下仍很难达到预期的打开效果。后期将采用65Mn 弹簧钢板作为囊带保护钢板。

3 等比例钢管片囊袋注浆打开试验

以下通过等比例钢管片囊袋注浆打开试验,对钢管片囊袋施工使用性能进行测试(见图9)。试验选取钢管片中的标准块进行试验,为确保囊袋端部的填充效果,注浆管位置选择在安装端部隔舱中间。

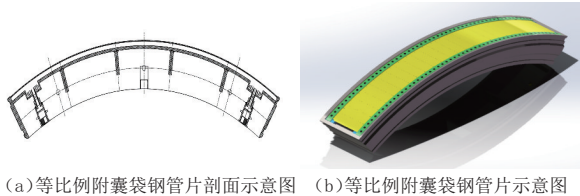


图9 等比例附囊袋钢管片示意图

3.1 无外荷载下钢管片囊袋注浆打开试验

如图10所示,首先通过无外荷载情况下的等比例附囊袋钢管片注浆打开试验,对钢管片囊袋的打开过程进行考察。注浆材料为双液浆(水泥浆液加水玻璃),设计注浆压力0.5 MPa,注浆量约150 L,分

别由2个注浆管同时进行等量注浆。

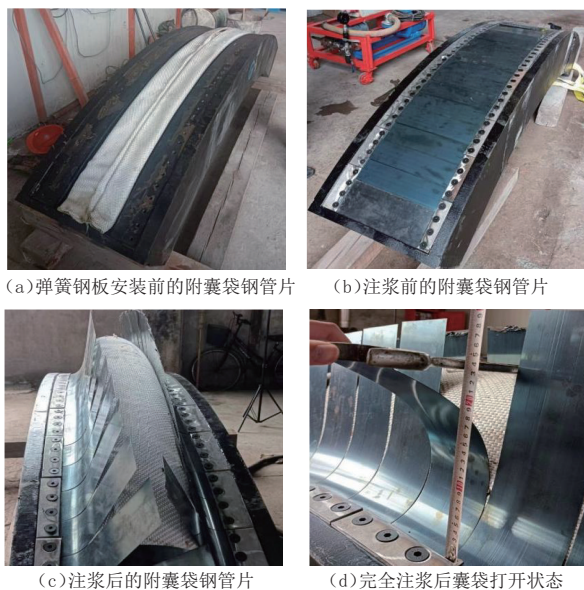


图10 无外荷载下的等比例附囊袋钢管片注浆打开试验

试验过程主要分为4个阶段。(1)试验开始阶段:开始注浆,即开始注入双液浆。此时,囊袋开始充盈,但外观无明显变化,压力表示数为0;(2)试验中间阶段1:囊袋继续注浆,压力表示数仍为0,囊袋表面缓慢鼓起。囊袋端部注浆管位置最先鼓起,中间位置随后缓慢鼓起;(3)试验中间阶段2:囊袋充盈速度减慢,压力表示数上升。压力表示数达到0.4~0.5 MPa时,由注浆位置向管片中部位置65Mn弹簧钢板逐片打开;(4)试验终止阶段:注浆量达到150 L左右时,压力表示数为0.5 MPa左右。弹簧钢板完全打开,囊袋高度约为235 mm,基本达到设计需求。

3.2 外荷载下钢管片囊袋注浆打开试验

以下通过有外荷载的等比例附囊袋钢管片注浆打开试验,对钢管片囊袋外压0.5 MPa工况进行试验。注浆材料为双液浆(水泥浆液加水玻璃),设计注浆压力为1.0 MPa,注浆量经计算约150 L,分别从两个注浆管同时进行等量注浆。

试验中,钢管片囊袋安装在钢管片外弧面,并固定在封闭钢箱底部,从内弧面引出2根注浆管。箱体内覆砂土,模拟钢管片囊袋负压工作状态,如图11(a)所示。砂土顶面到钢管片最高处约0.5 m,砂土顶面到钢箱顶面预留足够的注水空间。钢箱顶部接带球阀进水管、压力表、排气球阀以及0.5 MPa的泄压阀。

试验过程如下:(1)打开排气球阀,通过进水管向箱体内注水。排气球阀通水后,关闭排气球阀。

继续注水,水箱压力表示数开始上升。压力表示数达到0.5 MPa,泄压阀开始通水。关闭进水管球阀,箱体压力稳定在0.5 MPa;(2)通过注浆管向囊袋内注浆,注浆压力表维持在0.5 MPa。水箱压力表维持在0.5 MPa,泄压阀持续通水;(3)到达设计注浆量150升左右,注浆压力开始上升。最终,注浆压力上升至0.6 MPa,注浆速度减缓,泄压阀通水;(4)试验终止,打开钢箱检查试验结果。



图11 有外荷载下的等比例附囊袋钢管片注浆打开试验

试验表明:(1)弹簧钢板受顶部沙土影响,仍保持包裹囊袋状态,并随覆盖砂土卸压打开;(2)囊袋充盈充分,未出现漏浆现象;(3)囊袋最大鼓胀高度约235 mm,与无外荷载情况注浆结果基本一致;(4)试验未达到预期的1.0 MPa注浆压力,但实现了150 L的注浆量。

4 结 论

针对小半径曲线隧道转弯,文章设计了钢管片囊袋结构试验并得出以下几点结论:

(1)囊袋材料膨胀率对最终囊袋注浆打开后尺寸影响不大,囊袋尺寸宜以不膨胀理论尺寸为依据进行设计;

(2)为避免过度保护,导致囊袋无法有效打开,囊袋保护材料宜采用弹性较大的弹簧钢板;

(3)施工中,应以注浆压力及注浆量两个参数进行注浆控制。而且,在满足注浆压力的前提下,设备选型时应重点关注注浆设备的注浆流量参数。

参考文献:

[1] 闫志刚,赵玉成,杜立峰.急曲线盾构隧道近接施工研究[J].公路,2012(10):219-222.

[2] 张宏宇,许东来,范来华,等.急曲线管隧施工装备技术现状及展望[J].矿山机械,2008,36(17):1-5.

[3] 李海.小半径曲线地铁隧道盾构法掘进技术[J].铁道建筑技术,2009(9):99-102.

[4] 韦正平.近地铁隧道顶管施工技术[J].建筑机械,2023(8):123-126.

[5] 吴发展.城区繁华地段长距离顶管隧道施工技术[J].城市住宅,2021,28(7):225-226.

[6] 黄军,张守平.超长距离微盾构顶管管壁应力监测分析及中继间优化布置[J].吉林水利,2020(9):25-32.

[7] 赵立财.大跨径框架隧道中继间顶进既有铁路施工技术[J].铁道标准设计,2014,58(8):128-132.

[8] 张玉宝.浅析大直径泥水式盾构机小半径曲线隧道施工技术[C]//2015年中国城市科学研究会数字城市专业委员会轨道交通学组年会论文集.北京:中国城市科学研究会数字城市专业委员会,2015:261-263.

[9] 温竹茵.超大直径盾构小半径转弯技术研究[J].城市道桥与防洪,2015(9):210-214.

[10] 黄炜焱,林海骏.极小转弯半径的地铁隧道盾构施工技术[J].建筑施工,2019,41(10):1889-1892.

[11] 李林峰,谭忠盛,周振梁,等.天山胜利隧道敞开式TBM钢管片支护作用效果研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(5):984-990.

[12] 蒋涛.地铁隧道钢管片自动焊接技术研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(11):2283-2289.

[13] 金晖,王宾,陆勇,等.始发段盾构掘进诱发粉土地层与环境响应的实测研究[J].市政技术,2023,41(3):52-57.

[14] 由广明,温竹茵,刘念,等.急曲线超大直径盾构隧道设计关键技术研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(增刊1):221-227.

[15] 马玉强.小半径长距离曲线盾构隧道成型管片质量控制研究[J].福建建材,2023,261(1):97-99.

[16] 黄炜焱,林海骏.极小转弯半径的地铁隧道盾构施工技术[J].建筑施工,2019,41(10):1889-1892.

[17] 王岚.小转弯半径隧道盾构施工技术探讨[J].河南建材,2012(1):169-170.

[18] 张志伟,梁荣柱,李忠超,等.盾尾非对称推力作用下盾构隧道纵向变形分析[J].岩土力学,2023,44(1):88-98.

[19] 张宏飞,王召辉,权西宏,等.小曲率盾构隧道管片施工附加内力计算模型研究[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2023,39(2):64-69.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

