

承插式管片精度分析与控制研究

王军可¹, 李一伦², 武文清¹, 张海涛¹

(1. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211800; 2. 同济大学, 上海市 200082)

摘要: 承插式管片在结构安全性和拼装工艺上相比传统螺栓管片有了长足的进步, 同时对于管片和连接件的精度要求也更高。为了确保承插式管片中各项精度满足要求, 通过对于成品的三维激光检测数据进行精度分析, 同时通过梳理承插式管片和连接件的生产制造工艺, 对精度要求较高的环节进行优化控制。以南京江心洲污水收集系统穿越夹江段为工程背景, 分析管片制造全周期内精度控制的关键环节, 提出了具体的优化控制方案。

关键词: 盾构隧道; 承插式管片; 快速连接件; 精度控制; 三维激光检测

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)12-0232-06

0 引言

随着国内地下空间不断开发, 工程中施工技术日趋成熟, 采用承插式连接件的管片形式也在国内得到了成功的应用。这种管片形式区别于传统的螺栓管片, 其表面没有手孔也没有螺栓连接, 而是在各端面预埋了精度极高的承插式连接件, 通过特殊的拼装工艺将连接件组合安装从而实现管片的稳固连接。

这样的管片形式在最终的成型隧道质量上来看更加优秀, 无论是全隧道的沉降、收敛、变形还是隧道内的渗漏情况, 相比于传统管片都得到了大幅的优化。想要达到理想的成型效果, 承插式管片内的精度是重中之重, 在管片和连接件的生产周期内, 对各道工序的精度进行分析和控制研究是实现承插式管片新型隧道高精度完成的必经之路。过往, 有诸多学者对管片精度进行了深入研究, 这对承插式管片的精度研究具有一定的参考价值, 比如, 早在 2009 年, 严炳舵等^[1]就对混凝土管片宽度提出了精度要求, 同时改进了宽度测量工具; 2011 年, 朱海良^[2]结合完工的上海长江隧道管片的经验, 就超大直径高精度管片的生产工艺和关键工序的控制作综合简述; 再近十年来, 汪玉华^[3]、李磊^[4]、常舒^[5]等人在盾构隧道中利用三维激光扫描技术对管片模具进行检测, 实现

了对管片模具的全方位检测, 大大提高了管片模具的检测精度。

近年来, 国内已有实际工程率先采用了承插式管片进行试验段施工, 比如上海地铁 18 号线的入场线试验段, 取得了预期的成果, 参与其中的学者们也完成了相应的研究, 柳献等^[6]在此工程中开展了纵缝接头抗弯试验, 探究其极限承载性能, 明确其破坏过程和破坏状态; 张雨蒙等^[7]开展了设计工况下的整环足尺试验, 得到了不同拼装方式下新型衬砌结构的受力性能。

南京江心洲污水收集系统穿越夹江段是继上海 18 号线试验段后的一条采用承插式管片的盾构隧道, 也是国内第一条全隧道采用新型管片的水下穿江隧道。该工程在此前的研究基础上对盾构管片以及连接件进行了优化, 在精度上实现了进一步的提升, 最终的成型质量也得到了保障。本文将针对南京项目的承插式管片进行精度分析和控制研究, 从模具精度、管片生产工艺、连接件精度几个方面入手, 以期在现场生产工作和施工工作提供理论支撑, 为未来的承插式管片发展和推广提供参考。

1 预制管片生产精度分析与控制

混凝土管片本体质量直接关系到隧道的整体质量和安全, 影响隧道的防水性能及耐久性能, 而混凝土管片质量很大程度上取决于模具以及生产工艺。

1.1 管片模具精度与控制

管片模具精度是成品管片精度的直接保证, 管

收稿日期: 2024-01-26

作者简介: 王军可(1996—), 男, 本科, 工程师, 从事隧道工程管理与研究工作。

通信作者: 李一伦(1996—), 男, 硕士, 从事隧道工程管理与研究工作。电子邮箱: 2421138135@qq.com

片钢模的随机合模精度要求高于管片成品精度 0.15 mm 的标准,管片模具的检验是管片生产前和生产时的重要质量控制点,对于管片成品的精度控制至关重要。

(1)模具厂内验收

为保证管片模具满足施工要求,在模具投入使用前将对模具进行全面检验。在模具生产期间,派遣专业的技术人员到模具制造厂家进行厂内监督和厂内验收,对制造过程进行监控,并对制造完成的模具进行全面的检验,形成检验报告,合格后方可运送到管片厂使用。

(2)模具定位检测

模具经过正确安装后,将对模具进行全面的精度检测,并请监理工程师见证检测,在得到监理工程师许可后,模具方可投入管片试生产。

(3)三维检测

模具采用激光检测仪进行检测,对比设计尺寸分析模具制造偏差大小,判断对管片成型精度的影响程度。检测详情见第三章。

1.2 混凝土管片生产工艺

南京工程混凝土管片生产中使用固定模台施工方法,这种生产工艺有利于保证振捣质量和收面工序质量,同时施工工序可以实现就地作业,对模具的影响小且精度高。管片生产全周期的主要工艺流程见图 1。

其中,上述生产工艺流程中有诸多环节需严格控制现场作业顺序和质量。主要为:

(1)脱模:脱模时严格按照模具技术操作规程顺序,保证管片表面及棱角不受损坏,先拆端模,再拆侧模,严禁硬撬硬敲损坏管片和模具,见图 2。

(2)合模:人工手工先进行定位紧固,再用电动扭矩扳手(调至 400 N·m)对模具螺栓进行紧固,最后采用扭矩扳手对模具紧固螺栓进行检查,确保模具每次使用前,扭矩力值一致,见图 3。

(3)安装连接件:C 型件与 T 型件各自拥有对应的模具定位件,见图 4,首先将 C/T 型纵缝连接件与模具定位件滑入连接为整体,其次将其整体通过模具上螺栓进行限位及固定,见图 5,待后续浇筑成型后取下定位件。

(4)抹面成型:首次抹面使用高强槽钢板刮尺,刮去多余混凝土,待混凝土收水后用钢泥灰刀进行抹面,使管片外弧面平整、光滑。自然养护后使用抹刀进行二次收面,使其均匀分布、厚度适宜,确保生

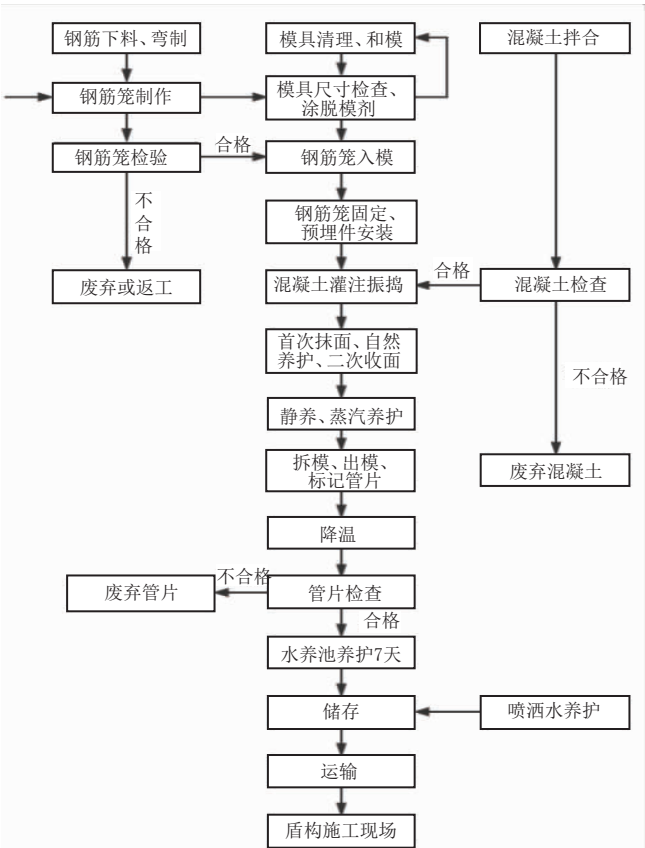


图 1 管片生产工艺流程图



图 2 管片脱模



图 3 电动扭矩扳手紧固模具螺栓



图 4 C/T 型连接件对应的模具定位件

简单的组装残余间隙,它涉及到每一条接缝处管片的拼装姿态误差,这些看似独立的误差会随着隧道管片圆形断面分块的不断拼装而不断累积,最终集中反映在封顶块的拼装上,会导致封顶块无法拼装或强行拼装破坏止水垫。

故在环向管片分块拼装过程中需加强检测,确保定位精度满足要求。具体为,安装定位允差不大于 0.5 mm,纵缝连接件轴线、中心线偏角不大于 0.15° 。整环拼装完成后检测环面间隙不大于 0.8 mm,每块测 6 个点;纵缝间隙不大于 0.8 mm,每条缝测 3 个点;各分块件高差不大于 1.0 mm。

而环缝连接件的拼装精度主要体现在定位误差上,由于采用的是插入式连接,内部螺纹需要尽可能地垂直插入才能最大程度地实现连接件的紧固效果。故连接螺杆的安装定位允差不大于 0.5 mm,与预埋螺母轴线偏差角不大于 0.15° 。

3 三维激光检测

激光跟踪仪是工业测量系统中一种高精度的大尺寸测量仪器。其集合了激光干涉测距技术、光电探测技术、精密机械技术、计算机及控制技术、现代数值计算理论等各种先进技术,对空间运动目标进行跟踪并实时测量目标的空间三维坐标。它具有高精度、高效率、实时跟踪测量、安装快捷、操作简便等特点。

3.1 管片模具精度检测

管片模具的精度直接决定管片浇筑后的成型精度,故有必要针对现场每一套模具进行多次三维激光检测,同时抽样检测养护完成后的管片成型精度进行对比分析。南京项目采用固定模台施工方法浇筑管片,现场共计两套模具,合计进行 $6+4=10$ 次三维检测工作。以第一套模具的第 1 次检测结果为例,分析模具精度以及由该模具产出的成型管片精度。

如图 10 所示,每块管片模具/成型管片均设置有 12 个测点,分布在管片的角点和棱边中点位置。根据由点到线的思想,相邻测点相连即可检测出想要的长度和倾角,再与设计尺寸进行对比即可得到管片制造误差,也即管片精度。

由于检测数据较多,且标准块与邻接块和封顶块的检测原理相同,测点数量和位置也相同,所以受篇幅限制只列出 B3 标准块的检测结果。

如表 1 所列,三维激光检测通过跟踪反射器在空间中的运动,捕捉到目标点的空间坐标,从而描绘出管片对应的几何尺寸。由检测结果可以看出,管片

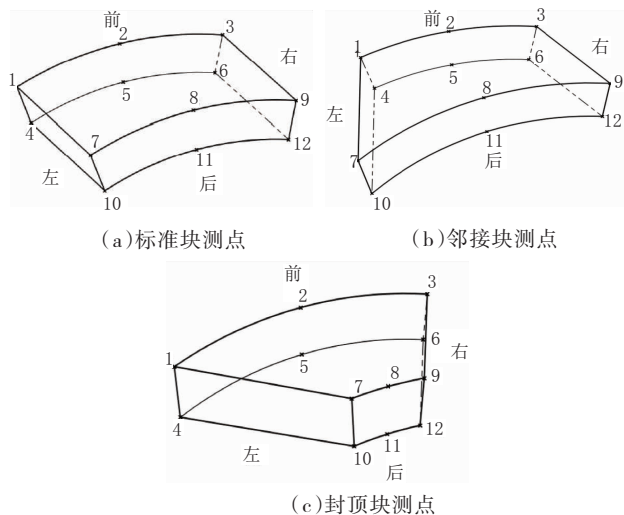


图 10 三维激光检测(几何测点)

模具的各项尺寸指标均满足模具对应的制作允差,同时对应生产的成型管片的几何尺寸也能满足管片本身的制造允差。另外,不难发现,管片模具的精度要求要高于成型管片,这是因为模具和管片之间是“蛋壳和小鸡”的孵化关系,只要严格控制模具的精度,成型管片就能顺理成章地达到精度要求,从成型管片绝大部分尺寸的生产误差都没有利用完允差这一点可以看出(即)。

除了上述点位之间的长度距离检测以外,还有诸多其他物理量的监测。譬如,模具/成型管片的前后左右端面与顶底端面之间的边角检测、纵向相邻端面之间的纵向锥度角监测等,见图 11,均需符合设计要求的几何尺寸允差要求。

3.2 C/T 型连接件精度检测

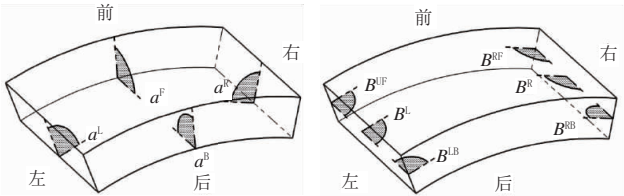
C/T 型连接件的精度控制主要集中在两构件的组合截面处,其中 C 型构件的内弧面和 T 型构件的外弧面均呈楔形,由外向内空间不断缩减,故此截面处的细节尺寸精度决定了承插式连接件拼装后的残余间隙大小,也就决定了连接件的拼装难易程度和最终的组装精度。故针对相互接触的楔形截面,C 型构件中的三维激光检测点位示意图 12,T 型构件测点与之相对应。

由于连接件本身构造极为精细,所以制造过程中难免会产生误差,当然这种误差的数量级是很小的,用游标卡尺或其他人工读数工具进行测量的话基本上是测不出或测不准的,而三维激光检测的精度可以满足检测的精度要求。

如表 2 所示,表中正值表示构件表面相对设计表面向外扩的趋势,负值表示构件表面相对设计表面向内缩的趋势。随着 C 型构件和 T 型构件制造过

表 1 三维激光检测结果(B3 标准块)

检测项目	点位示意	模具测量值 T_1/mm	设计值 t/mm	差值 $\Delta_1=T_1-t/\text{mm}$	模具允差 η_1/mm	成型管片测量值 T_2/mm	差值 $\Delta_2=T_2-t/\text{mm}$	管片允差 η_2/mm
管片环宽	1-7	1 508.88	1 509.10	-0.22	± 0.25	1 508.9	-0.2	± 0.4
	4-10	1 507.94	1 508.17	-0.23		1 507.8	-0.4	
	2-8	1 510.10	1 510.00	0.10		1 510.2	0.2	
	5-11	1 508.91	1 508.98	-0.07		1 508.8	-0.2	
	3-9	1 509.34	1 509.10	0.24		1 509.0	-0.1	
	6-12	1 508.23	1 508.17	0.06		1 507.9	-0.3	
管片厚度	1-4	450.63	450.00	0.63	± 1.00	450.2	0.2	± 1.0
	7-10	450.72		0.72		450.5	0.5	
	3-6	450.40		0.40		451.0	1.0	
	9-12	450.02		0.02		450.1	0.1	
弧长	1-2-3	3 770.30	3 769.91	0.39	± 0.40	3 770.1	0.2	± 0.4
	4-5-6	3 384.34	3 384.35	-0.01		3 384.2	-0.2	
	7-8-9	3 769.90	3 769.91	-0.01		3 770.1	0.2	
	10-11-12	3 383.98	3 384.35	-0.37		3 384.2	-0.2	
内径	—	3 950.04	3 950.00	0.04	—	3 949.9	-0.1	± 0.5
外径	—	4 400.03	4 400.00	0.03	—	4 401.1	1.1	+2.0



(a)边角 (b)纵向锥度角
图 11 三维激光检测(倾角测点)

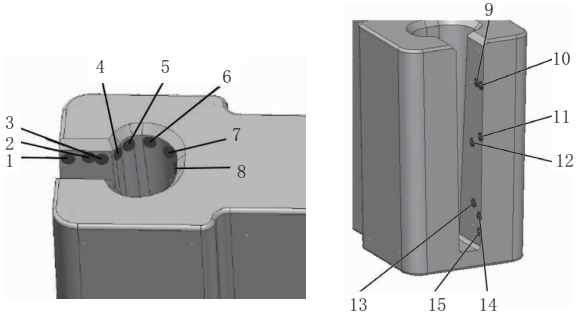


图 12 三维激光检测(连接件楔形截面)

程中分别产生了或扩或缩的趋势,设计预留的安装间隙也会或大或小的变化。不难发现,C型构件内弧

面的制造误差要大于T型构件外弧面,这与C型和T型构件的制作工艺有关,构件的制造要经过合模→浇铸→打磨→精加工等工序,而显然T型构件的打磨和精加工要比C型构件更顺手更高效,故控制连接件的制造精度就必须加强C型构件的内弧面尺寸精度。

表 2 三维激光检测结果(C/T型连接件) 单位:mm

位置	对应点位	C型内弧面 平均偏差	T型外弧面 平均偏差	间隙压缩 量
洞口直线段	1-2-3	0.174	-0.035	0.139
洞口曲线段	4-5-6-7-8	-0.065	-0.145	-0.210
楔形上半面	9-10-11	-0.121	-0.044	-0.165
楔形下半面	12-13-14-15	0.365	0.027	0.392
洞底	16-17	0.397	-0.244	0.153

4 结论与展望

承插式管片在盾构隧道中的应用已经成为了目前行业发展的必然趋势,越来越多的学者开始将研究重心转移向承插式管片和连接件中来。本文依托南京江心洲污水收集系统穿越夹江段新建工程,对承插式管片的生产工艺进行了梳理,也对管片和连接件的各项精度进行了检测和研究分析,得出以下结论和展望:

(1)管片模具的精度直接决定管片的成型精度,在管片进行流水线生产之前必须对管片模具进行多

次精细的检测和验收工作。

(2)管片模具和成型管片是“蛋壳和小鸡”的关系,故管片模具的尺寸精度要求高于管片成型精度,建议高出标准为 0.15 mm。

(3)纵缝连接件铸钢端头的连接效果直接影响了整环管片的拼装效果,也决定了整条隧道的成型精度,所以 C/T 型构件的精度控制至关重要。

(4)根据三维激光检测的结果,整体上来看,T 型构件的制造精度要高于 C 型构件,所以连接件的制造过程中要加强 C 型内弧面的打磨和精加工,确保为拼装留有足够的拼装空间。

参考文献:

- [1] 严炳舵,朱海良,李开建.高精度钢筋混凝土管片精度测量分析[C]//中国土木工程学会.地下工程建设与环境和谐发展——第四届中国国际隧道工程研讨会文集,2009:963-966.
- [2] 朱海良.超大直径高精度钢筋混凝土衬砌预制管片工艺综述[J].混凝土世界,2011(5):86-91.
- [3] 汪玉华,黄毅.盾构管片模具三维激光扫描检测关键技术[J].铁道标准设计,2020,64(3):118-122.
- [4] 李磊.超大直径盾构管片激光跟踪三维测量关键技术[J].工程技术研究,2021,6(10):10-11.
- [5] 常舒.基于三维激光扫描技术的管片数字化预拼装技术研究[D].北京:北京建筑大学,2022.
- [6] 柳献,李海涛,曹伟飏.盾构隧道新型纵缝接头抗弯性能试验对比研究[J].现代隧道技术,2018,55(增刊2):1058-1068.
- [7] 张雨蒙,张姣龙,曹伟飏,等.盾构隧道新型衬砌结构受力性能与设计参数[J].现代隧道技术,2018,55(5):201-209.
- [8] 管攀峰,杨志豪.管片新型快速连接件研发及接缝力学性能分析[J].隧道与轨道交通,2018(1):1-6,55.
- [9] 毕湘利.盾构隧道快速连接件及其结构体系应用研究[Z].2019.
- [10] 吕根喜,曹伟飏,陈昌耀.预制混凝土衬砌管片用快速连接件的研究及应用[J].混凝土与水泥制品,2022(5):38-41.
- [11] 官林星,孙巍,张孟喜,等.盾构隧道环向快速连接件力学性能试验研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(6):967-974.
- [12] 鲁志鹏,何应道,赵明应.盾构隧道 C-T 型快速连接件受力性能研究[J].现代隧道技术,2022,59(增刊1):542-549.
- [13] 王磊,吴兵辉,张旭辉,等.装配式预应力可变桁架体系加固 RC 短梁抗弯性能试验[J].中国公路学报,2021,34(2):246-255.
- [14] 蒋功化,刘丽萍,周德.大跨预应力混凝土连续梁桥的预应力损失识别[J].公路,2021,66(9):226-231.
- [15] 李碧卿,姜涛,徐文平,等.碳纤维板-角钢-体外预应力索联合加固梁试验[J].结构工程师,2023,39(1):132-140.

~~~~~  
(上接第 231 页)