

地铁盾构管片生产中的自动化设备应用研究

何玉斌

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 盾构隧道是地下交通系统的关键, 其构件制造水平对整体施工效率有直接影响。盾构管片预制过程涉及钢筋安装、模板定位、混凝土成型等多个高敏工艺节点, 且生产组织的连贯性构成稳定产出的要素。本文根据自动化设备对地铁盾构管片生产的价值, 围绕盾构管片生产中的焊接精度、脱模结构稳定、网片布设效率与混凝土弧面控制展开详细研究, 旨在对提升构件成型一致性有所裨益。

关键词 地铁盾构管片生产; 自动化设备; 焊接; 抹面工艺

中图分类号: U231.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.20.025

0 引言

当前城市轨道交通系统建设进入精细化与集约化并重的新阶段, 地下空间开发深度不断加大, 对隧道结构构件的制造质量与生产效率提出更高要求。盾构管片作为支撑隧道稳定的核心构件, 其成型过程涵盖钢筋焊接、模具装配、混凝土浇筑与脱模转运等高精度工艺流程。自动化设备为提升管片制造环节的标准化提供了关键支撑, 也为构建智能产线体系打下坚实的基础。在技术集成与流程协同持续演进的背景下, 地铁盾构管片的制造模式正在经历系统性重塑。

1 自动化设备对地铁盾构管片生产的价值

1.1 提升生产效率, 加速管片产出进程

地铁盾构管片是隧道建设的核心部件, 其制造速度直接影响整体工程进度, 采用智能化生产装置能够显著改善传统人工模式效率不足的问题。同时, 各类机械装置与智能控制系统的协同配合使得各环节作业能够在精准调控下无缝衔接, 减少了人为因素导致的节奏波动。在钢筋加工、物料浇筑以及成品脱模关键工序中, 智能化流水线一方面缩短了单次作业耗时, 另一方面还能同步开展多工序, 进而大幅提升日产量。这种稳定的生产模式让不同施工段的配合更为紧密, 降低了工期延误风险。此外, 该类系统面对大批量订单时具备优异的持续运转能力, 仍能保持高效输出, 为管片规模化制造提供可靠保障。与此同时, 智能化技术不但优化了生产流程, 而且减少了人工干预带来的不确定性。

1.2 保障人员安全, 降低作业风险系数

由于盾构管片制造涉及高温、潮湿、重载等复杂工况, 所以传统人工操作易面临吊装意外、设备误触

及机械伤害等潜在威胁^[1]。但是智能化生产系统利用远程操控或者自动化执行, 能够大幅减少人员直接接触高危作业环节的机会。如机械焊接臂、智能顶推设备和光学定位技术能够精准识别作业对象, 避免因人为疏忽导致的操作偏差。另外, 产线还集成多重安全防护机制, 一旦检测到运行异常或人员靠近危险区域, 系统可立即触发紧急停机, 快速切断事故蔓延路径。并且全封闭式生产结合中央监控模式能有效隔离粉尘、噪声和高温环境, 减少工人长期暴露在恶劣条件下的健康风险, 进而既提升了整体安全水平, 又为作业人员创造了更稳定可控的工作环境^[2]。

1.3 稳定产品质量, 提高管片合格比率

盾构管片是隧道结构的核心承重部件, 对几何尺寸、材料强度及外观质量都有着极高标准。虽然传统人工生产方式容易因操作者状态波动或技术差异导致产品性能不稳定, 但是引入智能化制造体系后, 从模具拼装到钢筋布设, 再到混凝土浇筑与养护, 每个步骤都能利用数字化精准调控。高精度传感装置与在线检测技术可即时捕捉管片成型数据, 并与预设参数自动比对, 及时修正微小偏差, 避免缺陷产品进入后续流程。此外, 智能抹平设备可以使构件表面更加平滑规整, 显著降低修补和废品率。利用全过程质量监控与自适应调整, 能有效保障管片的力学性能, 让产品一次验收合格率明显提升, 完全符合工程设计寿命。

1.4 降低能源消耗, 实现绿色生产目标

盾构管片制造过程中的钢材成型与混凝土浇筑工序属于典型的高耗能环节, 不过传统生产模式因管理粗放普遍存在能效低下和原材料浪费现象。数字化生产系统经过精确调控能源分配, 成功解决了设备待机

能耗以及重复工序造成的电力浪费问题。除此之外，运用实时工况监测的生产调控系统可动态优化加热参数与养护方案，减少能源浪费。废热回收装置与材料再生系统的协同运作，使资源利用率获得整体提升。企业借助能耗数据监测平台的分析功能，能够制定更科学的能源管理策略，并且该模式在控制碳排放的同时，构建了资源循环利用的完整链条。将环保理念融入制造全过程，自动化生产线在保证产能的同时可实现更低单位能耗，此方式既符合当前节能减排的政策导向，也为轨道交通建设的绿色发展提供了切实可行的解决方案^[3]。

2 地铁盾构管片生产中应用自动化设备的策略

2.1 优化焊接流程设计，提升异形骨架成型精度

异型管片钢筋骨架的焊接质量直接影响最终产品的尺寸精度和结构可靠性。传统手工焊接依赖操作者技术水平，在特殊形状部位容易产生位置偏差、角度误差以及焊缝质量不达标等问题。引入智能化焊接系统后，利用数字化编程控制焊枪运动轨迹，能够适应各种复杂几何形状的连续焊接需求。针对异型骨架尺寸多变、连接节点复杂的特点，自适应路径规划技术可高精度点位焊接，使各连接部位受力均衡，避免局部变形^[4]。系统集成焊接参数动态调节功能，实时优化电流强度、行进速度和焊枪姿态，维持稳定的熔池状态，显著降低热变形风险，保证异型构件尺寸稳定性。这种数据驱动的焊接模式取代了传统经验判断，一方面提高了工艺一致性，另一方面还为质量追溯提供了完整的数据支持。

施工人员在实际操作中应采用弧焊机器人完成异形钢筋骨架的立体组装，并在焊接前利用三维建模系统还原设计图纸与实际构件的空间关系。接下来，焊接路径以0.02 m间隔生成关键点序列，每一段路径包含焊接角度控制范围在 $\pm 3.50^\circ$ 以内，且焊枪偏移误差控制在0.50 mm以内，保障熔深均匀分布。操作台还需要配备激光跟踪用来校正焊枪运行轨迹，避免因骨架轻微变形导致焊接节点偏移。在定位异形弯折段前，技术人员依据钢筋预制角度设置夹具限位块，使其受控在 $\pm 1.20^\circ$ 内，进一步提升焊接预设精度。为避免高温扭曲影响成型稳定性，可使用分段冷却与跳焊方式，让系统自动调整每段焊缝热输入，使焊接间歇周期维持在4.2~5.0 s之间，有效控制整体应力分布。在焊接完成后，智能检测臂扫描每条焊缝连续性与厚度，数据同步上传至制造监控系统进行比对分

析，误差超过0.25 mm则自动标注返工点，保证每个焊缝均达到结构强度标准。焊接完成的异形骨架利用液压顶升装置转运至成型模板中，误差数据汇总后用于下一批次参数优化，形成闭环反馈机制，逐步提高批量构件尺寸一致率。

2.2 集成液压顶出装置，防止钢筋脱模结构变形

管片脱模是预制过程中最容易出现质量问题的环节，传统方法主要依靠人工操作千斤顶或简易机械装置，存在施力不均、定位不准等缺陷，经常造成管片边角破损或钢筋移位。为解决这些问题，可运用新一代智能液压脱模系统，该系统用模块化设计让每个液压顶出单元都配备独立控制系统，并能够根据管片形状自动调整施力大小以及方向。系统内置高精度传感器网络，可以实时监测脱模过程中的压力变化，保证整个脱模过程平稳可控。特别设计的缓冲机构能有效吸收瞬时冲击力，避免管片突然脱离时产生的振动损伤^[5]。系统还具备自学习功能，能够记录每次脱模的参数数据，结合大数据分析不断优化作业流程。实际应用表明，这套系统可以将脱模合格率提升到99.2%以上，同时将作业时间缩短30%。

具体操作时，工作人员需要按照标准流程执行以下步骤：先系统自检确认所有液压单元工作正常，油压稳定在3.5~4.0 MPa设定范围内。然后根据待脱模管片的规格型号，从数据库调取对应的作业参数，包括顶出顺序、施力大小和速度等。系统会自动分配16个液压顶杆的工作任务，其中8个主顶杆负责主要承重，另外8个辅助顶杆提供稳定支撑。开始脱模前，要先启动预热程序，让液压油温度达到40~50℃最佳工作状态。正式作业时，系统会按照先中心后四周的顺序依次启动顶杆，相邻顶杆的启动间隔控制在0.5 s以内。整个顶出过程分为三个阶段：初始阶段采用0.5 mm/s慢速顶出，中期适当加快速度到1.0 mm/s，最后阶段再次减速到0.3 mm/s以确保平稳脱离。在脱模过程中，施工人员需要密切关注控制屏上的实时数据，特别是压力曲线和位移监测值。如果发现某点压力异常升高或位移滞后，系统会立即启动自动调整程序。脱模完成后，要全面检查管片的尺寸测量、表面检查和内部质量。并且所有检测数据都会自动记录并生成报告，作为后续工艺改进的依据。

2.3 协同双机对称布设，增强网片定位安装效率

在地铁盾构管片生产中，传统人工搬运与定位方式存在工序衔接不畅、空间定位偏差等问题，特别是

在大型模板内布置多层网片时，易因协同误差导致安装错位。为解决这一问题，双机协同布置技术用两台并行操作的机械臂，控制称轨迹规划能够在确保空间对称性与角度精度的同时提高单件安装效率。双机械臂通过空间互补布局形成均衡的作业体系，使安装点位与工序节奏精确匹配，有效减少装配误差导致的应力分布不均问题。该系统兼容多种规格模板，支持轨迹自适应功能，可稳定保持安装深度的精确性。

施工人员在管片生产线进行网片布设前，先把两台定位机械臂分别位于模板两侧并呈现出对称状态，间距保持在 3.20 m。控制系统中预设模板宽度、纵深与布设点数量后，自动生成布设路径，按照左右对称原理将模板划分为两个作业区域。同时，每台机械臂对应一侧区域向两侧均匀展开，动作起始点设定为模板底部中心轴线，布设总长度设定为 2.40 m，间距控制在 0.30 m，系统生成 8 组布设坐标。机械臂运行轨迹由控制台程序调度，每一步动作都需传感器确认定位精准后才执行夹持、移动和投放。另外，在定位过程中，两侧机械臂抓取同一批网片的起始高度设定为 2.10 m，下降速度控制在 0.15 m/s。在移动至指定位置后，定位检测模块检测网片是否与模板中心对齐。如果偏差超过 0.80 mm，机械臂自动回退并重新调整角度和夹持深度。每片网片投放时间约为 18 s，双臂同步完成安装后自动进行下一组布设。整个模板范围内布设完毕后，辅助压紧装置启动，压紧头下压行程为 30 mm，压力控制在 3.80 MPa，保持 3 s 固定，防止钢筋移动或悬浮（如表 1 所示）。

表 1 模板抹面作业中关键点参数

布设点 编号	X 轴位 置 (m)	投放高 度 (m)	对中偏 差 (mm)	下压行 程 (mm)	固定压 力 (MPa)
P1	-1.60	2.10	0.4	30.0	3.80
P2	-0.80	2.10	0.6	30.0	3.80
P3	0.00	2.10	0.3	30.0	3.80
P4	+0.80	2.10	0.5	30.0	3.80
P5	+1.60	2.10	0.2	30.0	3.80

2.4 升级抹面工艺流程，规避混凝土弧面缺陷

混凝土管片脱模前的表面质量直接影响其拼装精度，其中曲面区域的空鼓、裂纹等缺陷会显著削弱管片间的应力传递效果。传统抹面工艺存在轨迹随机、压力不均等问题，容易引发曲面部位易出现气泡残留、浆体分布不均等质量隐患。但是改进后的工艺采用基

于模板几何特征的智能抹面系统，结合数字化建模生成自适应运动轨迹，动态贴合抹面工具与混凝土曲面。该系统集成压力反馈和倾角调节功能，可根据曲面曲率实时优化作业参数，保证接触压力均匀分布。

在管片脱模前 12 min，操作人员启动自动抹面设备，系统自动识别模板规格并生成匹配的 3D 仿形作业路径。抹面起点位于模板顶部中心位置，设备沿纵向 2.10 m 的行程逐层下移，横向每 0.05 m 覆盖一次。抹面压头采用弹性浮动设计，各接触点压力维持在 3.20 ~ 3.50 MPa，并依据模板弧度自动微调，弧形区压力比平面区提高约 0.15 MPa，以抵消侧壁浆料沉降影响。与此同时，设备运行速度设定为 0.08 m/s，在拐角或端部位置降速至 0.05 m/s，保证浆料充分填充并排出空气。抹面宽度固定为 300 mm，每段作业结束后压头保持 3 s 静压增强密实度，随后抬升进入下一工序。除此之外，模板周边每隔 0.60 m 布置激光定位传感器，实时监测设备与模板的贴合精度。若检测到偏差超过 ±1.00 mm，系统立即修正压头位置后继续作业。全程耗时 22 min，系统同步存储压力曲线、运动路径及模板信息。

3 结束语

当前地铁盾构管片制造正加速向智能化转型，各工序自动化设备的协同作业能力已成为产线技术水平的重要体现。未来，需重点推进设备通信标准化建设，建立多场景工况自适应系统，深化智能检测与过程控制的有机结合。同时，在模具循环利用、能耗管理、质量预判等环节进一步整合技术资源，为地铁隧道工程建设提供更坚实的技术支撑。

参考文献：

- [1] 陈炳炎. 地铁盾构近距离下穿铁路桥桩安全风险控制 [J]. 建筑机械, 2025(05):95-100.
- [2] 关嘉旭. 地铁盾构管片自动化生产中真空吸盘的结构优化与可靠性分析 [J]. 居业, 2025(03):187-189.
- [3] 徐浩, 李慎奎, 吴圣贤. 地面加、卸载下地铁盾构隧道管片变形规律及加固效果研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(03):175-180.
- [4] 胡秋斌, 师一鸣, 曹伟庭, 等. 基于弯矩传递足尺试验的大直径地铁盾构隧道承插式管片环间传力性能研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(04):161-164, 171.
- [5] 赵善鹏, 吴宣哲, 薛华坤, 等. 基于内聚力模型的盾构管片承载能力测试方法分析及评估：以福州滨海快线地铁项目为例 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(27):11519-11528.