

摘要：介绍了一种应用于地下工程的大型预制混凝土构件——矩形管节的特点、生产工艺、关键的制作环节以及该产品在上海市轨道交通 6 号线浦电路站地下通道的应用情况。

关键词：矩形管节；钢模；混凝土；钢套环

0 引言

矩形盾构隧道是国外在 20 世纪 90 年代开发应用的新颖盾构隧道技术，由于其断面利用率高、覆土浅、施工成本低等优点，该项技术可用于城市交通人行地道、车行地道、地下管线共同沟、引水和排水管道工程，矩形管节是供矩形盾构掘进使用的最主要的结构材料。上海轨道交通 6 号线浦电路站 3 号出入口采用 6.24 m×4.36 m 的矩形断面隧道顶管施工，所用管节（见图 1）外形尺寸为 6.24 m×4.36 m×1.5 m，为国内之最，管节间连接采用“F”型插口连接，接缝防水装置由锯齿形止水圈和弹性密封垫等内外多道组成。管节混凝土设计强度等级为 C40，抗渗等级为 P8，管身设吊装孔和翻身孔和压浆管、管节内外部均设各种钢板埋件，每节管节重 37 t 左右。



图 1 管节成品

1 工艺特点

工艺过程：（见图 2）

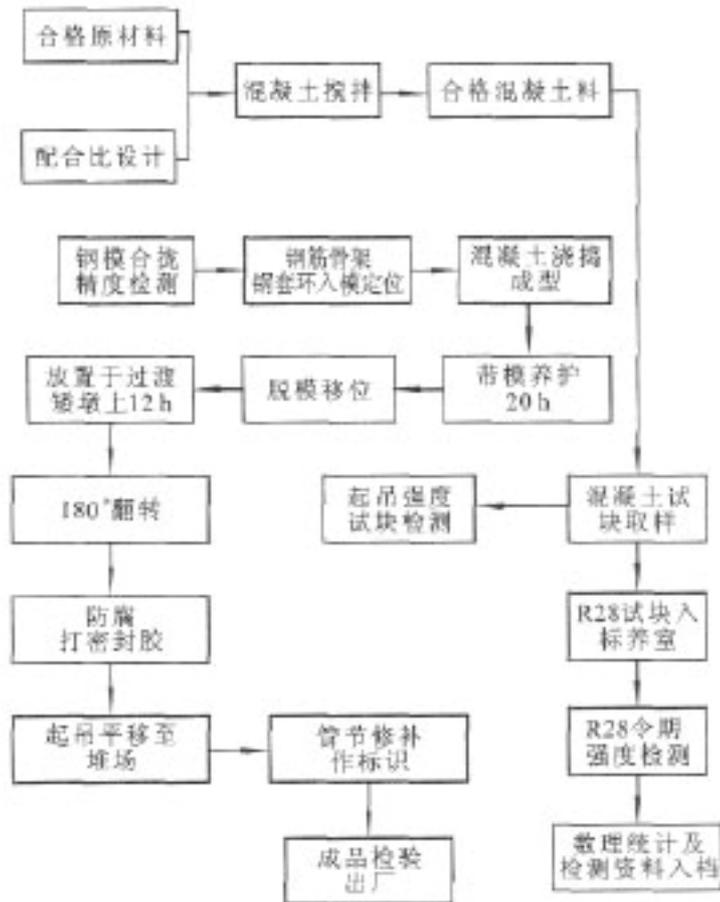


图2 管节制作工艺流程

与一般构件的预制相比，这种矩形管节有以下几个特点：

(1) 钢套环制作精度要求高。地下人行通道采用混凝土管节自防水和接缝防水，混凝土抗渗等级为 P8，接缝处钢套环和钢环要求顶进施工时精密的配合，同时还要压紧止水橡胶密封圈，所以制作精度要求较高。

(2) 管节外形尺寸。地下人行通道管节为大型构件，长度和宽度以及高度允许误差均为 $\pm 2\text{ mm}$ ，对角线误差为 $\pm 3\text{ mm}$ ，这要求模具组装精度高。

(3) 埋件定位。管节四周设有压浆管，外壁设置吊装孔和翻身孔，内壁顶部和左右两侧均设有预埋钢板。为保证施工过程中注浆的顺利进行，压浆管必须定位准确，并保证与管壁垂直，为保证翻身过程中不致倾覆，翻身孔也必须定位准确。

(4) 翻身和运输。由于管节自重大（37 t 左右），翻身过程中惯性也大，混凝土达到一定强度后必须进行翻身使插头向下，所以如何安全地进行翻身和运输成为管节制作中的又一个难点。

2 关键工艺分析及质量控制

2.1 模具

矩形管节采用可拆式、具有足够刚度和精度的整体型良好的钢结构模具（见图 3 钢模装配图），由内外模和底模三大部分组成。底模为坚固的钢结构，底模能精确定位组装，附有可靠的支持体系，底模由四块组成，拼装时应放在固定基础上，外模与内模拼装在底模的四周，具有足够的刚度和平整度不会产生弯曲变形，在长度方向有三个定位销，在宽度方向有二个定位销固定，以确保混凝土浇筑时外模不变形，外模与外模配合的四角侧板上连接采用开槽定位销和连接螺栓，以防混凝土浇筑时侧板变形，外模在装模时应下口先接触定位销，下口偏外再合模，内模的四角有可收支撑和活动的铰组成，可收支撑向内收时可使模板和混凝土脱离便于脱模。



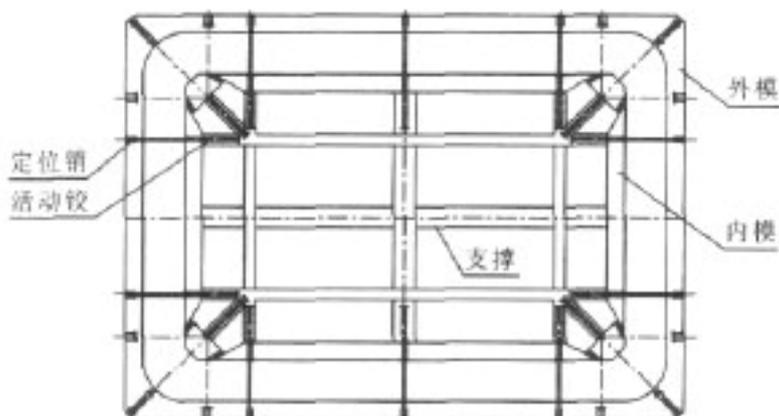


图3 钢模装配图

模具进场之前，依据管节重量、模具重量和施工中其他荷载做好基础，要求模具在使用过程中底座不变形，特别是长边不凹陷。模具的检测项目有承口内、外长净尺寸；承口内、外宽净尺寸；插口内、外长净尺寸；插口内、外宽净尺寸以及高度。

模具底座地定位和平整度直接影响管节的质量，要保证矩形管节混凝土端面的平整度，底模的定位是其中决定性的因素。由于构件比较庞大，对精度要求比较高，避免施工中发生移动，底模安装到位后，必须用水准仪测量标高，至少取8个点（4个角上，4条边的中点），标高差值控制在1mm，经调整后，方能进行电焊固定，确保底模水平，这样插口的混凝土端面的平整度就有了保证。而承口混凝土端面的平整有赖于混凝土浇捣完成后的压实抹光，端面的倾斜量的控制，应小于5mm。

模具的拼装顺序：底模定位→内模就位→钢筋骨架整体吊入钢模→埋件定位→外模就位→混凝土保护层检查→模具拼装检测。

2.2 混凝土配合比设计

管节混凝土除了满足强度等级为C40P8外，还要经20h自然养护，达到设计强度等级35%可脱模起吊，12h后强度达到50%可翻身，具有低徐变，低收缩，良好的工作性，控制水化热。

通过试验室试配和试生产验证，确定如下配合比：

- (1) 为降低水化热，采用52.5级纯硅酸盐水泥，水泥用量小于 340 kg/m^3 。
- (2) 用水量小于 170 kg/m^3 ，水胶比0.50。
- (3) 选用高效减水剂，减水率大于18%。
- (4) 选用中砂细度模数 $2.5\sim 3.1\text{ mm}$ ， $5\sim 25\text{ mm}$ 优质碎石。
- (5) 控制坍落度 $(70\pm 30)\text{ mm}$ 。

2.3 钢套环及钢环的制作

钢套环的精度直接影响管节接头的密封防水功能和浇捣精度，要求很高。钢套环、钢环的圆弧部份须冲压成型，圆弧长度部份必须与钢模密贴不漏浆，钢套环一般分12段拼接（包括4段弧形板，8段直条形板）

(1) 落料。先计算矩形钢套环的周长，制作钢套环须扣除延长量。第一次制作后得出延长量值，第二次落料应减去延长量，如此试验几次后确定一个标准数据作为后批落料的标准尺寸，每进一批钢材都按上述步骤进行定尺放样落料。

(2) 去除毛刺。定尺放样后，采用自动割刀切割落料，切割完成后，需对其一边进行倒角，倒角采用自动剖口机，待冷却后去除毛刺，人工打磨成光滑和顺坡形状。

(3) 定尺圆弧，条形板制作后，可用液压系统调整靠模，先对板条成圆位置处划线并进行检测，直到符合要求为止，然后可以大批量制作，靠模需要用样板经常检测，以确保制作精度。

(4) 焊接成型，为确保焊接成型场地的平整，需要制作一个长度和宽度比钢套环稍大的工作平台，先在平台上画出钢套环的位置，再依据画出的位置焊接钢套环靠模，靠模的制作精度要高，焊接成型前，必须先测量钢套环的实际周长，确保无误后进行接头剖口焊接。



(5) 焊接成型、打磨光滑后应对钢套环、钢环进行适当矫正整形，以保证钢模环、钢环入模后与钢模的密贴不漏浆。钢套环、钢环的拼接缝除目测外，还应以直尺进行检测，以保证拼接处于同一平面之内。对矫正整形、毛刺的打磨、倒角处破口是否达到打磨光滑和顺坡形状以目测控达要求。

(6) 承口钢套环宽度、承口钢套环内径、插口钢环外径允许误差均为 ± 2 mm，钢套环和钢环两对角线尺寸误差小于 3 mm。

2.4 钢筋笼的制作

主筋的圆弧弯曲须在改制后专用成型机上进行，钢筋对焊接不得位于圆弧部位。两面主筋的搭接长度部份应至少有三个及以上焊点连接，内外主筋间的箍筋与主筋的焊点须全部焊牢，不得跳焊（钢筋笼制作流程见图 4）。



图 4 钢筋笼制作流程

管节钢筋笼总装焊接应在专用钢筋笼靠模上完成。完成总体焊接的骨架应保证混凝土保护层厚度的要求。

管节上的预埋件、压浆管件须穿超钢筋笼时，不得切断主筋。对辅筋可以切断后进行补强措施。

对每班主筋弯弧的数量抽取 5%且不少于 10 件进行量测，对圆弧部位用靠模进行量测。对每班完成的管节焊接骨架进行逐件检验，必要时采取二氧化碳气体保护焊接，以确保焊接骨架的质量，用于钢筋笼的原材料、切断和弯曲成型后的几何尺寸，机械性能，都必须进行检测，符合相应的规范要求后主能投入到下一工艺流程环节。

2.5 钢套环、钢筋骨架、埋件入模定位。

入模顺序是：底模、内模就位→钢套环、内钢环入模→钢筋骨架整体吊装入模→钢套环、内钢环锚筋焊接及压浆孔、起吊孔埋件定位→上口内外钢环就位以及锚筋焊接→模板定位固定检查→浇捣准备。

管节钢模在每次拆模后应清理干净，均匀涂刷脱模剂。钢套环、钢环及预埋件均应紧贴模板并予以固定，确保制作过程不出现漏浆及移位现象。

钢筋骨架入模前必须先将保护层垫块固定在内圈主筋上，保护层垫块设置间距为每米一只钢筋骨架在吊装时必须由专用吊具进行吊装，以确保入模后的钢筋骨架整体性。

管节钢模拼装质量是保证管节成品精度的关键，图纸中相关的说明、标准是控制拼装精度的参数，每次管节混凝土浇捣前必须对管模的合拢精度进行检测。

浇捣前主要查验内容有隐蔽工程、保护层、埋件位置、合模质量和构件的几何尺寸，确认无误后方可浇捣。

2.6 管节混凝土浇捣和养护

管节混凝土采用立式（承口朝下）振动成型工艺。浇捣混凝土时，可以按管节的高度方向分三层来布料。头一层布料后插入式振棒必须插至距底部约 10 cm 的地方，振捣棒纵向插点间距不得大于 30 cm（采用 70 振捣棒），宜以交叉



偏于一侧前震的方式来震捣密实。振捣第二层和第三层混凝土时，振捣棒须穿至下层表面，使上下层结合成一体。振捣时避免碰撞钢筋，预埋件和钢模对钢筋密实部位应以多振和缩短插点的间距，避免漏振和不密实。保证混凝土的振实质量，应适当控制好混凝土的黏聚性和坍落度。坍落度控制在 50~80 mm，振捣成型后的管节上端面应压实抹光，抹面次数不得少于三次，端面要求确保光滑平整。管节在混凝土浇捣及上口面收水抹光结束后，应即时盖上塑料薄膜并再外覆帆布，将整个管模连同管节包裹密实，作为起吊拆模的强度试块和管节同条件养护。经 20 h 养护后，经检测试块强度，如达到设计强度等级 35%即可脱模起吊。起吊后的管节平移至座墩上，静置管节到达 50%设计强度等级后方可翻身，打密封胶，最后吊运至临时堆放区，做外观检查或修补及检测。

2.7 管节拆模与吊装翻身

管节吊装孔和翻身孔的优化设计。吊装孔采用外径 $\Phi 102$ 内径 $\Phi 88$ mm 钢管，长度为 200 mm，翻身孔采用外径 $\Phi 133$ 内径 $\Phi 119$ mm 钢管，长度同样为 200 mm，为防止吊装孔和翻身孔管节外表面周围处的混凝土起吊时受力而破裂，必须在吊装孔和翻身孔上焊接 50 mm 的环板（厚 8 mm），并用两根 $\%20$ 和两根 $\Phi 16$ 的钢筋与钢筋骨架焊接牢固，管节拆模，管节经自然养护 20 h 左右后混凝土强度达到设计强度的 35%即可拆模，先打开内外模合缝口，使内外模与管节完全脱开，将内外模板移至安全位置，吊走管节。拆模时避免对钢模及管节造成碰伤。

管节的吊装翻身，由于管节体积庞大，重量达 37 t，所以这一环节特别应引起重视，管节起吊和翻身的顺序是：模具与管节完全脱离、吊车就位、专用水平吊安装在管身两侧四肢起吊孔内、安放四只过渡矮墩、起吊（高出管节内模高度）、将管节吊至过渡矮墩上、管节起吊放在专用翻身架上、管节 180°翻身、管节下端（插口面）放置 4 只矮墩、管节钢套环清理及打密封胶、静置 28 d 后出厂。拆模后的管节在门式起重机及专用水平吊的作用下，将管节平移至临时过渡墩上静置至少要达到 12 h；将已达到 50%设计强度等级的管节才能吊至翻身架上，作 180°翻转，使之钢套环朝上；对管节内外表在及边角应作适当清理，对企口位置打密封胶，对管节作实目检测。

2.8 防水处理方法

管节间连接方式与盾构隧道管片的连接不同，盾构隧道管片间采用螺栓连接，纵向和环向都能拉紧管片，同时，在管片近外弧面遇水膨胀橡胶止水条的共同作用下，能在接缝处起到很好的防水作用。而顶管管节间一般只靠挤压力连接（见图 5），所以管节上的几道防水措施一定要仔细施工，单组分挤出型遇水膨胀密封胶施工难度大，施工过程中对环境要求高，施工质量不能保证，改用相同膨胀率的遇水膨胀橡胶密封条后施工比较方便，同时橡胶密封条能和钢套环紧密均匀的粘合，防水效果比较理想，同时聚氨酯密封胶的施工也应均匀饱满。为防止顶管施工过程中的管节后退，管节外可设预埋钢板与洞口连接，内部四角同样埋设钢板以便于管节间用角钢连接，这样能有效地防止管节间的松动，提高防水效果。

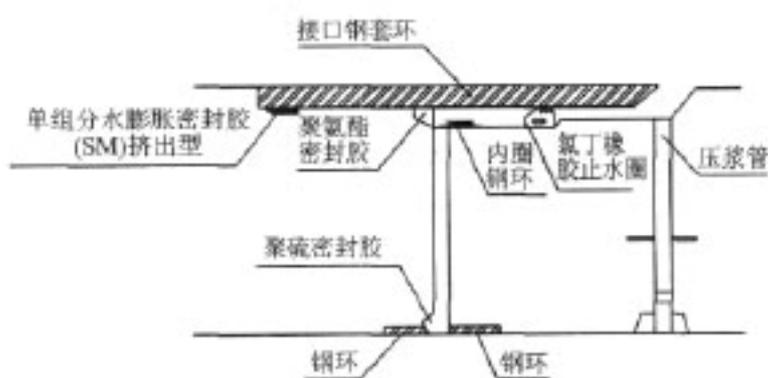


图 5 管节防水构造图

3 工程应用

上海市轨道交通 6 号线浦电路站（3 号出入口东方路）地下通道（见图 6），顶管推进的始发井深 13.79 米，位于东方路东侧，接收井深 11.85 米，位于东方路西侧。通道采用由上海机施公司与小松（中国）公司共同设计研发的矩形盾构掘进机，该盾构机高 4.39 m，宽度 6.27 m，长 5.4 m，自重 170 余吨，轴线最大误差仅为 10 mm，创造了盾构机



穿越地下管线最小距离 300 mm 的奇迹，推进方向为由东至西，最大埋深为 11.624 m。通道坡度为 3%，最大覆土厚度为 7.264 m。顶管推进距离共 42 m，有 28 节管节组成，每节长 1.5 m，管节内径 5 240 mm×3 360 mm，外形尺寸为 4 360 mm×6 240 mm，环厚为 500 mm，环宽为 1 500 mm，每节管节的重量约 36 t。机施公司于 5 月 13 日开始推进，以每天 1.5 节的速度于 6 月底完成，该技术填补了我国在这一技术领域和地下施工设备设计制造领域的空白。

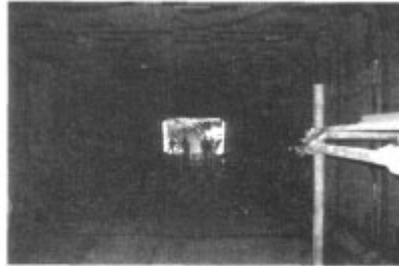


图 6 现场施工图

4 结语

大断面矩形管节制作的控制重点在于模具的精度、钢套环、钢环的精度以及埋件的定位，此外，防水处理也必须到位。矩形管节在应用方面取得了很好的成果，效益明显，为地下工程的开发起了开拓作用，这一技术将得到进一步完善，可以预见，减小管节的壁厚，进一步增大管节的外形尺寸，增大使用面积将是管节发展的一个新方向。

