

# 地铁隧道内衬钢制环加固施工工法

余守龙

武汉市市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430000

**[摘要]**目前随着城市轨道交通的不断发展,盾构法施工在隧道施工中运用的也越来越广泛,在盾构掘进中盾构机本身可以克服小半径、不良地层等问题,但预制管片在拼装时及运营后却往往因难以承受盾构急纠偏、地基承载力不足所造成的管片变形及破裂。传统修补手段,多采用环氧树脂混合砂浆进行修补,但在地铁长期运营震动下易脱落造成反复修补,且传统修补方法只适用于小面积修补,对管片砼大块碎裂、边角侵线后的处理及修补仍然束手无策。本篇文章为解决好这一问题,避免已竣工隧道反复修补,提高整体施工质量,减少后期影响提出些好的方法。

**[关键词]**地铁隧道;内衬钢制环;加固施工;工法

DOI: 10.33142/sca.v4i6.5055

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

## Reinforcement Construction Methods of Steel Ring Lining in Subway Tunnel

YU Shoulong

Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

**Abstract:** At present, with the continuous development of urban rail transit, shield construction is more and more widely used in tunnel construction. In shield tunneling, the shield machine itself can overcome the problems of small radius and bad stratum, but the prefabricated segment is often difficult to bear the segment deformation and fracture caused by rapid deviation correction of shield and insufficient foundation bearing capacity during assembly and after operation. The traditional repair methods mostly use epoxy resin mixed mortar for repair, but it is easy to fall off under the vibration of subway long-term operation, resulting in repeated repair. Moreover, the traditional repair methods are only suitable for small-area repair, and there is still no way to deal with and repair after large pieces of segment concrete are broken and edges and corners invade the line. This paper puts forward some good methods to solve this problem, avoid repeated repair of completed tunnels, improve the overall construction quality and reduce the later impact.

**Keywords:** subway tunnel; lined steel ring; reinforcement construction; construction methods

### 1 工法特点

工程所采用的材料均为耐久性较强的钢制材料,安装完成后变成均有防锈蚀处理,施工完成后耐久性可与地铁运营寿命匹配,地铁运营期间不用反复修补;通过化学螺栓锚固及结构胶填充,可与管片形成整体,与传统修复技术相比,管片整体刚度更为稳定;由于借用原有管片整体强度,钢环加固后可大大提高原有管片强度,且不会出现管片手孔填充物脱落及隧道顶部渗水等影响列车运营的障碍,降低了运营安全风险。

### 2 适用范围

适用于盾构法隧道因区间隧道小半径转弯或不良地层管片沉降,造成的已拼装衬砌环超错台量不大于6cm,管片混凝土碎裂比例不超过20%的管片修复施工。

### 3 工艺原理

地铁隧道内衬钢制环加固施工工法是在隧道管片保有一定强度的前提下,利用预制好的钢制环片对隧道管片进行加固处理。钢环安装前按照隧道管片分块,以便于运输及安装,安装时需保证管片与钢制环纵缝不再一个平面内,确保受力均匀。钢制环各纵、环向缝连接采用焊接方式连接,钢制环与管片采用化学螺栓相连接,确保钢制环安装后与管片整体受力稳定。管片与钢制环之间的空隙则采用结构胶填充,确保填充密实。

### 4 施工工艺流程及操作要点

#### 4.1 施工工艺流程

施工工艺流程参见图1。

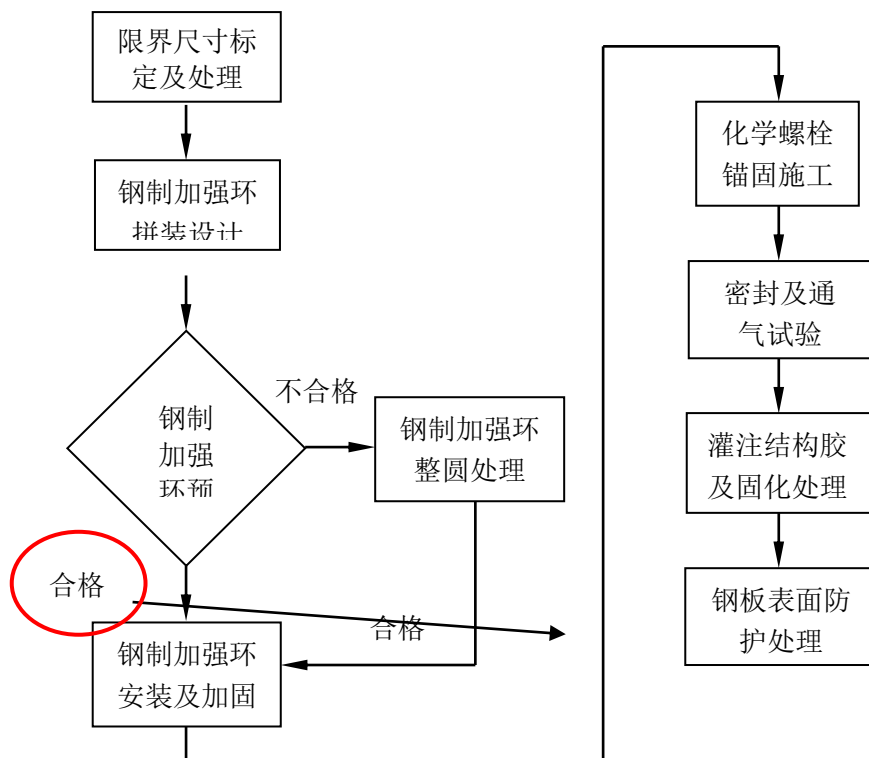


图2 工序流程图

## 4.2 操作要点

### 4.2.1 限界尺寸标定及处理

①安装钢制加强环前首先对管片进行测量定位，通过全站仪量测每块管片的两端点及中点来确定管片拼装后的形状及与相邻管片间的位置关系；管片现有拼装情况通过全站仪测量标定后，将环向内超出限界的管片与钢环重叠部分绘制成图并做好标记。即如管片内径为5400则运营限界尺寸为5360mm；

②将管片超出限界部分，按照测量定位的尺寸进行打磨，打磨完成后进行复测，确保隧道净空尺寸满足安装要求；

③将管片上占有油污或灰尘的地方进行清洁处理，用酒精或丙酮清洗混凝土结合面，要求表面无油污、无灰尘。

### 4.2.2 钢制加强环拼装设计

钢制加强环按管片分块设计（一般地铁分块为6块）安装前需针对每环管片的拼装点位、纵缝连接位置及管片损害程度进行具体的钢制加强环拼装设计，主要设计原则有为：

①钢制加强环纵缝连接需与管片纵缝错开，确保加强环与管片不在同一纵向位置受力；

②钢制加强环环向连接需与管片环缝错开，并搭接至相邻管片上，搭接长度不小于50cm。

### 4.2.3 钢制加强环预拼装

将 $\Phi 20$ 钢筋预弯成环，焊接环形框架，钢制加强环运至现场后将6片钢制加强环逐片拼装成环，每片钢制加强环暂时用 $10\text{cm}\times 20\text{cm}$ 的10mm厚钢板连接，拼装成环后检测其有无错缝、翘板等质量问题，并检测其椭圆度是否小于3%。

### 4.2.4 钢制加强环安装及加固

①利用专用平板车将钢环运至现场，用机械臂吊装到位，把钢环紧靠粘合面，在混凝土上相应位置钻固定化学锚栓孔。也可用放样的方法确定混凝土中的固定孔位置。为控制注胶层的厚度，可在每个紧固螺栓孔周围塞垫一定厚度的垫片；

②在钢板上钻化学锚栓孔和注胶孔，注胶孔的大小应与灌浆嘴相匹配，并保证注胶孔周边能密封；

③在钢环安装前，钢板及混凝土粘贴面进行表面处理，应认真进行。钢板应进行除锈、打磨处理，混凝土粘合面应进行打磨或凿毛处理；

④钢制加强环每块之间采用C02气体保护焊，焊接质量要求相邻钢制加固环之间的间距不大于3mm，且相邻钢制加固环之间焊接需采用坡口焊方式，坡口形式为L型坡口。焊缝厚度及角度根据《钢结构焊接规范》要求，具体见表1口焊焊缝厚度表；

**表1 表坡口焊缝厚度表**

坡口形式	焊接方法	钢板厚度 (mm)	角度 (°)	焊接位置	焊缝计算厚度 (mm)
L形坡口	气体保护焊	≥6	45°	横焊	h
				立焊、仰焊	h-3
注	h为坡口高度				

⑤根据板厚焊丝直径选用 2.5mm (具体见焊丝直径选择参照表), 焊接时将电流调整至 200A~300A 区间值内, 电压调整至 26V~32V, 焊丝伸出长度保持焊丝直径的 10~15 倍距离, 单焊道按时每分钟 300~500mm 控制, 确保焊接质量, 具体见表 2 焊丝直径选择参照表。

**表2 焊丝直径选择参照表**

焊丝直径 (mm)	熔滴过渡形式	可焊板厚 (mm)	施焊位置
0.5~0.8	短路过渡	0.4~3	各种位置
	细颗粒过渡	2~4	平焊、横角
1.0~1.2	短路过渡	2~8	各种位置
	细颗粒过渡	2~12	平焊、横角
1.6	短路过渡	2~12	平焊、横角
	细颗粒过渡	>8	平焊、横角
2.0~2.5	细颗粒过渡	>10	平焊、横角

#### 4.2.5 化学螺栓锚固施工

①钢制加强环与管片间的连接采用 HIT-CS-FM20 化学螺栓, 螺栓分布按横、纵向 300mm 布置;

②按照标准锚固深度进行钻孔, 严格控制钻孔深度, 具体见表 3 HIT-CS-FM20 化学螺栓技术参数表, 表 4 螺栓几何尺寸表;

**表3 HIT-CS-FM20 化学螺栓技术参数表**

锚杆规格技术参数	HIT-CS-FM20
钻头直径 (mm)	22
钻孔直径 (mm)	23
抗拉承载力设计值 (KN)	44.3
抗剪承载力设计值 (KN)	78.4
标准锚固深度 (mm)	170
有效锚固深度 (mm)	158
最小基材厚度 (mm)	230

**表4 螺栓几何尺寸表**

图标	化学螺栓几何尺寸	HIT-CS-FM20
d <sub>1</sub>	直径 (mm)	20
l <sub>1</sub>	锚栓长度 (mm)	240
l <sub>2</sub>	埋深深度 (mm)	170
l <sub>3</sub>	螺纹长度 (mm)	70
l <sub>4</sub>	椎体长度 (mm)	110

③清孔: a. 用压缩气体如气泵或气筒吹尽孔内粉屑。b. 用毛刷将孔内壁附着的粉屑清除。c. a、b 反复多次, 最大限度清尽孔内粉屑;

④旋入螺杆: 在结构胶涂入孔内后, 利用螺杆埋入前端 45 度切角, 后端旋入六角螺帽并用电动工具驱动旋入孔底即停, 确认有固化胶体上升至孔口附近;

⑤养护时间见表 5 凝固时间表。在养护期不允许勿摇晃螺杆。

表 5 凝固时间表

安装时温度	大于 20℃	10℃-20℃	0℃-10℃	-5℃-0℃
移动安装夹头需等待的最短时间	8 分钟	20 分钟	30 分钟	60 分钟
达到完全承载状态需等待的时间	20 分钟	30 分钟	60 小时	5 小时

#### 4.2.6 密封及通气施工

①密封施工：用抹刀将钢板周边缝隙、化学锚栓及注浆嘴周围间隙用封口胶密封，不允许出现密封不严现象。封口胶在 25℃时的可操作时间约为 60min，可根据施工具体情况确定每次配胶量，以免造成不必要浪费；

②通气施工：在灌浆粘贴面周边每隔 0.5m 左右插入一软管作为排气管，钢板周边各角都应设置排气管，倾斜或垂直安装的钢板只需在顶边设置排气管。

#### 4.2.7 灌注结构胶

采用 A 级结构胶进行钢制加强环壁厚填充，用脚踏泵或其它灌浆机具从注浆嘴压力注入封口胶胶液，注胶工作应从一端开始，当邻近注胶嘴有胶液流出时，将当前的注胶嘴封闭，移至出胶的注胶嘴继续注胶。当排气管中有胶液流出时则将其弯折扎紧。注胶的同时用橡皮锤敲击钢板，由声音判断胶液流动情况及胶液是否注满。倾斜及垂直安装的钢板要从最低位置开始注入。最后一个排气管应在维持注入压力的情况下封堵，以防胶层脱空，具体见表 6 A 级结构胶性能指标表。

表 6 A 级结构胶性能指标

结构胶性能	指标
抗拉强度 (MPa)	≥30
抗压强度 (MPa)	≥65
与混凝土的正拉粘接强度 (MPa)	≥2.5，且为混凝土内聚破坏

#### 4.2.8 固化处理

注胶施工后最初几小时应注意检查是否有流胶现象，以防脱胶。常温 (25℃) 下，固化不少于 3 天；固化温度降低，固化时间相应延长。若固化温度低于 5℃，应采取红外线灯 (或碘钨灯) 加热等加温措施或使用低温固化改性产品。

#### 4.2.9 钢板表面防护处理

①基面处理：采用手工或电动工具除锈的方法进行除锈清理，达到 St3 级标准。表面预处理合格，经监理人员确认后下进行下道工序；

②防锈底漆施工：防锈底漆采用环氧类防锈底漆，干膜厚度为 40 μm 一道；

③防火、防腐涂料施工：防锈底漆施工完 48 小时后，再进行防火主料的涂装施工，且施工环境应达到 (温度 0~35℃，相对湿度 ≤85%) 的条件。防火、防腐涂料应分次涂装，第一道涂装干膜厚度不得超过 200 μm，以后各道涂装干膜厚度不得超过 300 μm，每道间隔时间为 24 小时。

### 4.3 劳动力组织

劳动力组织参见表 7。

表 7 劳动力组织情况表

序号	工作内容	所需人数	备注
1	钻孔工	4 人	负责 HIT-CS-FM20 化学螺栓锚固
2	焊工	3 人	负责钢制加强环的焊接
3	注胶工	4 人	负责结构胶的注入
4	涂料工	3 人	负责防锈、防火、防腐漆的涂刷
5	辅助工	5 人	负责配合各工种作业
	合计	19	

## 5 材料和设备

### 5.1 主要材料

#### 5.1.1 钢板

钢板采用 Q345 钢板，钢板厚度 30mm，环宽 1500mm，钢板采用冷弯预制成环。

#### 5.1.2 化学螺栓

锚栓采用 HIT-CS-F M20 化学锚栓，具体性能指标见表 8 HIT-CS-F M20 化学锚栓技术参数表。

**表 8 HIT-CS-F M20 化学锚栓技术参数**

锚栓参数名称	参数值
钻头直径 (mm)	22
钻孔直径 (mm)	23
抗拉强度设计值 (KN)	44.3
抗剪强度设计值 (KN)	78.4
标准锚固深度 (mm)	170
最小基材厚度 (mm)	230

### 5.1.3 结构胶

灌注结构胶采用 A 级胶，具体性能指标见表 9 A 级结构胶性能指标表。

**表 9 A 级结构胶性能指标表**

结构胶性能	指标
抗拉强度 (MPa)	≥30
抗压强度 (MPa)	≥65
与混凝土的正拉粘接强度 (MPa)	≥2.5, 且为混凝土内聚破坏

### 5.1.4 药性焊丝

药芯焊丝药粉填充系数为 13~16%，主要选用 TiO<sub>2</sub> 含量为 92% 以上的金红石，占药粉重量的 35~55%，铁粉占药粉重量的 15~30%。另加适量的 SiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO 组成适当的熔渣，添加适量的含 K、Na 元素稳弧剂提高电弧的稳定性，添加适量铝粉、铝镁粉提高焊缝抗气孔的能力，添加适量 Si、Mn 铁合金获得相应的化学成分和力学性能。该焊丝的主要特点，电弧稳定、飞溅小、脱渣容易，细直径药芯焊丝适合全位置焊接。

## 5.2 主要设备

钢制加固环施工设备见表 10 主要设备表；

**表 10 主要设备表**

设备名称	型号	功率	数量
二氧化碳保护焊机	YD-350GL4	350A	2
注浆机	MS-02A	500W	2
25 吨汽车吊	SY-025		1
5 电动葫芦			2
管片平板车	ZTZB-04T		1

## 6 质量控制

### 6.1 质量控制标准

地铁隧道内钢制加强环隧道修复施工质量按《建筑结构加固工程施工质量验收规范》、《钢结构工程施工质量验收规范》、《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结构分级》、《钢结构设计规范》、《钢结构焊接技术规范》及《盾构法隧道施工与验收规范》相关标准执行；

**表 11 地铁隧道内钢制加强环隧道修复施工质量控制表**

序号	项目	允许偏差		检查方法
		单位	数值	
1	椭圆度	°	3‰	全站仪
2	钢制加强环收敛	mm	3	水准仪
3	化学螺栓布设间距	mm	≤350	钢直尺
4	结构胶 25℃ 下垂流度	mm	≤2	
5	涂料每层厚度	μm	-5	干漆膜测厚仪
6	涂料总厚度	μm	-25	干漆膜测厚仪
7	坡口间隙	mm	+2/-1	焊缝量规

## 6.2 质量控制要点

- (1) 钻孔时必须使用与锚栓相匹配的钻头，并不得损伤钢筋；
- (2) 环、纵缝焊接检测必须采用 C 级检测等级，C 级检测至少采用两种角度探头在焊缝的单面双侧进行检验。同时要两个扫查方向和两种探头角度的横向缺陷检验。母材厚度大于 100mm 时，采用双面双侧检验。具体见表 7.2 C 级检测探伤面及使用折角。其他附加要求：
  - a. 对接焊缝余高要磨平，以便探头在焊缝上作平行扫查；
  - b. 焊缝两侧斜探头扫查经过的母材部分要用直探头作检查；
  - c. 焊缝母材厚度大于等于 100mm，一般要增加串列式扫查，扫查方法见下表 12；

表 12 C 级检测探伤面及使用折角

板厚, mm	探伤面	探伤法	使用折射角或 K 值
>100	双面双侧	直射法	45° 和 60° 并用 (K1 和 K1.5 或 K2 并用)

(3) 灌注结构胶时，用小锤轻轻敲击钢板，检查钢板与混凝土表面粘结合实度，规范规定锚固区粘结面积不应少于 90%，非锚固区粘结面积不应少于 70%，如达不到则应采取补救措施；

(4) 涂装时构建表面不应误涂、漏涂，涂层不应脱皮和返锈等。涂层应均匀、无明显皱皮、流坠、针眼和气泡等。

## 7 安全措施

- (1) 参加施工的作业人员必须是经过安全培训，并考核合格持证上岗者；
- (2) 施工人员必须严格按照施工规范、方案和各项安全操作规程进行作业，同时必须服从项目部的综合管理；
- (3) 所有用电设备必须按照国家项规定装接，确保用电安全；
- (4) 所有灌浆设备必须配备压力表，且在使用前必须进行校正处理，以免压力过大，爆管伤人；
- (5) 环向灌浆加固施工需对钢制加强环 360° 注射，因此在钻孔及灌浆前必须佩戴好安全帽，高处作业时必须系安全绳，做好安全防护措施；
- (6) 在离地面 1.5m 以上作业时，工人必须配带安全绳工作。

## 8 环保措施

- (1) 合理布置场地，加强施工用材料的存放管理，各类建材存放应定点定位。
- (2) 施工现场材料、设备按平面布置图指定地点整齐堆放，派三人夜间看守，并与看守人员保持通信联系不间断。施工废渣要及时清运出场，材料、设备、机具及时回收归库，做到工完场清；
- (3) 洞内施工需做好通风措施，通过外部送风、内部排风的方式形成气流循环，提高洞内空气质量。

## 9 效益分析

(1) 地铁隧道内钢制加强环隧道修复施工可减少施工的反复多次投入，其加固后的效果可满足修复处 50 年以上的地铁正常运营；

(2) 地铁隧道内钢制加强环隧道修复施工其使用的材料刚度高，与管片黏贴度好，可减少管片修复对地铁运营的影响，具有显著的社会效益；

表 13 成本分析对比表

钢制加强环施工 (元)	投入次数/周期	环氧树脂修复施工 (元)	投入次数/周期
150000	1 次/50 年	19000	1 次/15~30 天

武汉市市政建设集团通过借鉴地铁在处理径距时的设计经验，结合隧道修补特点，总结出了一套通过钢制加强环加固能满足隧道长期运营质量的施工工法，并成功的应用于轨道交通三号线一期第八 B 标段土建工程双墩站~王家墩中心站区间隧道修补施工中，取得了良好的成效，隧道自 2015 年年底通车至今未出现反复修复的情况。

### [参考文献]

- [1] 王学广, 龙明华. 地铁隧道施工对既有高铁隧道的影响数值模拟分析[J]. 广东建材, 2021, 37(7): 53-56.
- [2] 张国栋, 刘昌, 张素磊, 等. 浅埋隧道施工扰动下含空洞土岩复合地层变形规律研究[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(3): 14-21.

作者简介: 余守龙 (1989.4-) 男, 毕业院校: 湖北工业大学, 所学专业: 工程管理, 当前就职单位: 武汉市市政建设集团隧道工程公司盾构分公司, 职务: 副经理, 职称级别: 中级、二级建造师。