

团 体 标 准

T/CSPSTC XXX—2021

地铁盾构隧道结构修复加固技术规程

Technical specification for repair and reinforcement
of subway shield tunnel

（征求意见稿）

2021-XX-XX 发布

2021-XX-XX 实施

中国科技产业化促进会 发布

目 次

前言..... II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语、定义和符号..... 1

4 基本规定..... 5

5 病害分级..... 6

6 设计..... 7

7 施工..... 11

8 质量检验与验收..... 15

9 检测和监测..... 16

附录 A（资料性） 渗漏病害修复材料性能建议指标.....19

附录 B（资料性） 破损、变形病害修复材料性能建议指标..... 26

附录 C（资料性） 钢内衬加固施工顺序和要求.....24

参考文献..... 29

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由 XXX 提出。

本文件由中国科技产业化促进会归口。

本文件起草单位：XXX、XXX、XXX 等

本文件主要起草人：XXX、XXX、XXX 等

引 言

世界上 50 多个国家的 150 多座城市开通了超过 10000km 的地铁线路。我国自 1969 年建成第一条地铁线路以来，地铁运营里程和客运总量也得到了快速的发展。随着地铁线路的建设和运营发展，地铁的客运总量也逐年攀高，地铁将成为我国主要城市的主要出行方式，支撑和引领城市可持续发展。因此，保障地铁的安全运营具有重要的民生意义。但是根据工作实践，发现盾构隧道病害出现后，缺乏修复加固方面的依据。在工程实际中，通过摸着石头过河，逐渐积累了一些修复方面的工作经验。目前盾构隧道结构病害主要包括渗漏病害、破损病害和变形病害，各类病害的修复时机、病害的发展程度、采用何种方式修复，修复措施的工艺流程等方面尚未有标准可依。

地铁盾构法隧道结构修复加固技术规程的编制，一方面，将进一步规范盾构法隧道修复加固工作，确保地铁结构安全可靠；另一方面，通过明确盾构法隧道各阶段的加固方式和修复工艺，更加科学高效地开展盾构法隧道维保工作。

地铁盾构隧道结构修复加固技术规程

1 范围

本文件规定了地铁盾构隧道结构修复加固的基本规定、病害分级、设计、施工、质量检验与验收、检测和监测。

本文件适用于直径不大于7.0 m洞通未运营或已运营地铁盾构隧道的修复加固工作，其他尺寸盾构隧道的修复加固可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB 50911 城市轨道交通工程监测技术规范
- GB/T 8074 水泥比表面积测定方法(勃氏法)
- GB/T 8110-2008 气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝
- GB 18445 水泥基渗透结晶型防水材料
- GB 23440 无机防水堵漏材料
- GB/T 23446 喷涂聚脲防水涂料
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准
- GB 50208 地下防水工程质量验收规范
- GB 50300 建筑工程施工质量验收统一标准
- GB 50728 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范
- DL/T 5193 环氧树脂砂浆技术规程
- JGJ 63 混凝土用水标准
- JGJ/T 212 地下工程渗漏治理技术规程
- JC/T 483 聚硫建筑密封胶
- JC/T 984 聚合物水泥防水砂浆
- JC/T 986 水泥基灌浆材料
- JC/T 1041 混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料
- JC/T 2037 丙烯酸盐灌浆材料
- JC/T 2041 聚氨酯灌浆材料

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件

3.1.1

盾构隧道 Shield tunnel

采用盾构法施工技术修建成的预制管片拼装式混凝土隧道。

3.1.2

湿渍 Wet stain

隧道外部水的作用下，在隧道管片内表面（即背水面）呈现明显色泽变化的潮湿斑。

3.1.3

渗水 Water seepage

水从隧道管片内表面（即背水面）渗出，在背水面可观察到明显的流挂水膜范围。

3.1.4

滴漏 Drip

水从隧道管片内表面（即背水面）以滴落的方式进入隧道内。

3.1.5

线漏 A lot of water leakage

水从隧道管片内表面（即背水面）以线状或喷水状进入隧道内。

3.1.6

漏泥沙 Silt leakage

因渗水通道扩大或防水失效，渗漏进入管片内的水量增加，同时夹带泥沙。

3.1.7

管片裂缝 Segment crack

管片上出现的环向或纵向的混凝土裂缝，常规采用宽度、长度、深度等指标判定裂缝的严重程度。其中贯穿裂缝指裂缝深度已经等于管片厚度；贯通裂缝指裂缝长度已经等于裂缝开展方向的管片长度。

3.1.8

管片剥落 Segment spalling

管片端部、螺栓孔或管片中部出现的缺角、掉块等现象，常规采用剥落半径、剥落深度等指标判定管片剥落的严重程度。

3.1.9

管片错台 Segment slab staggering

相邻环在垂直于隧道轴线平面内发生的相对位移，或单环内相邻管片沿径向产生相对位移。

3.1.10

接缝张开 Seams open

相邻环间接缝（环缝）未紧贴而产生的张开现象，或单环内相邻管片间接缝（纵缝）未紧贴而产生的张开现象。

3.1.11

道床脱空 Track bed void

对整体式道床，在横向断面变形、纵向不均匀沉降或列车循环振动荷载作用下，道床混凝土与管片脱离的现象。

3.1.12

收敛变形 Convergence deformation

盾构隧道横断面方向，变形后的隧道直径与理论正圆直径相减，取绝对值后最大的数值，以管片直径最大变化量表示，分为通缝管片收敛变形和错缝管片收敛变形。

3.1.13

纵向相对变形 Longitudinal relative deformation

某一隧道区段范围内，反映隧道纵向曲率变化特点的指标。

3.1.14

快速封堵 Fast plugging

采用速凝型封堵材料对渗漏病害进行封堵，以快速修复渗漏病害的方法。

3.1.15

嵌填密封 Inlay seal

采用密封材料对渗漏病害进行密封，以修复渗漏病害的方法。

3.1.16

注浆止水 Grouting sealing

在压力作用下注入灌浆材料，切断渗漏水流通道，以修复渗漏病害的方法。

3.1.17

壁后注浆 Back fillgrouting

向隧道衬砌与围岩之间或土体的空隙内注入灌浆材料，达到防止地层及衬砌变形、以修复渗漏病害的方法。

3.1.18

涂抹封闭 Daub and seal

在背水面涂抹水泥基渗透结晶型防水材料，通过渗透、反应、结晶堵塞混凝土细微裂缝，提高混凝土致密性与防水性，以解决混凝土裂缝病害的方法。

3.1.19

灌浆法 Grouting method

以一定压力将灌浆材料注入混凝土裂缝当中，通过灌浆材料与原结构材料的有效结合，对受损混凝土进行填充、堵漏和加固，以解决混凝土裂缝病害的方法。

3.1.20

填充法 Filling method

通过直接填充或开槽填充的方式，使修补材料和原结构材料有效结合，对受损混凝土进行填充、堵漏和加固，以解决混凝土裂缝病害的方法。

3.1.21

无筋嵌填修补 No reinforcement infill repair

采用早强快硬修补材料分层嵌填，对混凝土剥落病害进行修复的方法。

3.1.22

有筋嵌填修补 Reinforcement infill repair

采用植筋、钢筋网片等材料，结合早强快硬修补材料分层嵌填，对混凝土剥落病害进行修复的方法。

3.1.23

钢内衬加固 Steel lining reinforcement

又称钢环加固、隧道内张钢圈加固。为弥补隧道结构承载能力不足，满足结构使用寿命期内功能和耐久性要求，采用环形钢板，通过膨胀螺栓或化学锚栓固定于隧道内弧面，并进行充填粘结，以此形成钢环与原隧道结构共同受力的一种工艺。

3.1.24

地表卸载 Surface unloading

通过在盾构隧道上方卸载，减少隧道上覆压力，以改善隧道受力状态的一种隧道病害修复方式。

3.1.25

洞外注浆 Grouting outside the tunnel

在隧道外部，用适当的方法将某些能固化的浆液注入隧道周边地层的裂缝或孔隙中，通过充填、混合或挤压等方式填充空隙、改善隧道周围土层物理力学性质、减轻收敛变形和隧道纵断面相对变形等。

3.1.26

洞内道床底注浆 Grouting under track bed

在隧道内部，用适当的方法将某些能固化的浆液注入隧道衬砌与道床之间的裂缝或孔隙中，通过充填方式解决道床脱空问题，洞内道床底注浆是洞内注浆的一种。

3.1.27

壁后注浆 Grouting behind segment

在隧道内部，用适当的方法将灌浆材料注入隧道衬砌与围岩之间或土体的空隙中，达到阻止渗漏等目的的施工过程。

3.1.28

洞内隧道外注浆 Grouting inside the tunnel

在隧道内部，用适当的方法将某些能固化的浆液注入隧道周边地层的裂缝或孔隙中，通过充填、混合或挤压等方式填充空隙、改善隧道周围土层物理力学性质、形成隧道底部或侧向的有效支墩、减轻收敛变形和隧道纵断面相对变形等，洞内隧道外注浆是洞内注浆的一种。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

C: 管片收敛变形（直径变化量）

D: 隧道外径

h : 管片剥落最大深度值

k : 纵向相对变形量，在笛卡尔坐标 $y(x)$ 下，
$$k = \frac{|y'|}{(1+(y')^2)^{\frac{3}{2}}}$$

r : 管片剥落的等效半径值（对于非圆形剥落），
$$r = \sqrt{s_{\text{剥落面积}}/\pi}$$

s : 单个湿渍、渗水面积

v : 渗水、滴水、线漏、漏泥沙平均速率

w : 管片裂缝宽度值

Δ : 管片错台量

δ : 接缝张开量

$S_{\text{剥落面积}}$: 剥落病害的面积

4 基本规定

4.1 地铁盾构隧道结构病害修复加固前应进行检测，根据检测结果进行分级。

4.2 地铁盾构隧道结构病害分级采用单项指标法，评定时以最不利一项评定因素的病害程度作为隧道结构最终的病害程度分级。隧道病害分级按表 1 执行。

表 1 地铁盾构隧道结构病害分级

病害级别	评定因素			
	程度	发展趋势	对隧道结构安全的影响	对运营安全影响
I 级	严重	迅速	严重影响隧道结构安全	严重影响运营安全
II 级	较严重	较快	已经影响隧道结构安全	已经影响运营安全
III 级	中等	较慢	将来会影响隧道结构安全	将来会影响运营安全
IV 级	轻微	稳定	无影响	无影响

4.3 病害级别为Ⅳ级时，可暂不采取处理措施，但应对病害进行跟踪巡检；病害级别为Ⅲ级时，宜采取处理措施；病害级别为Ⅱ级时，对渗漏病害，应立即采取处理措施；对破损病害和变形病害，应采取处理措施；病害级别为Ⅰ级时，应立即采取处理措施。

4.4 在地铁盾构隧道结构修复施工前，应具备下列资料：

- 工程地质和水文地质勘察报告；
- 地铁盾构隧道结构监测检测数据或受损评估报告；
- 原隧道结构竣工图纸及相关技术资料；
- 周边环境资料及远期规划；
- 地铁盾构隧道结构修复工程设计文件；
- 地铁盾构隧道结构修复工程施工方案；
- 其他相关的文件资料。

4.5 对于洞内注浆、洞外注浆工程，还应收集加固工程施工区域附近的建构筑物、地下管线和障碍物等资料。

5 病害分级

5.1 成型地铁盾构隧道结构病害是指影响隧道结构安全性和耐久性的现象，主要包括渗漏病害、破损病害、变形病害、材料劣化等。

5.2 渗漏病害根据严重程度分为湿渍、渗水、滴漏、线漏、漏泥沙。

5.3 破损病害根据病害特点分为管片横（纵）向裂缝、管片剥落（包括剥离、缺角、掉块、松动）。

5.4 变形病害根据病害特点可分为收敛变形、纵向相对变形、管片错台、接缝展开、道床脱空。

5.5 地铁盾构隧道结构病害分级判定宜参考表 2 执行，判定时以最不利一项判定因素作为隧道病害的最终分级。

表 2 主要病害分级标准

病害类型		病害级别			
		Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅰ级
渗漏病害	湿渍 S/m^2	$S < 0.2$	$0.2 \leq S < 1.0$	$S \geq 1.0$	/
	渗水 $S/m^2, \nu/(L/m^2 \cdot d)$	$S < 0.2$ $\nu < 0.05$	$0.2 \leq S < 1.0$ $0.05 \leq \nu < 0.25$	$S \geq 1.0$ $\nu \geq 0.25$	/
	滴漏 $\nu/(滴/min)$	/	$\nu < 20$	$2 \leq \nu < 300$	$\nu \geq 300n$
	线漏 $\nu/(L/min)$	/	/	$\nu < 0.06$	$\nu \geq 0.06$
	漏泥沙 $\nu/(m^3/天)$	/	/	$\nu < 0.01$	$\nu \geq 0.01$
破损病	管片裂缝 w/mm	$w < 0.2$	$0.2 \leq w < 0.3$	$0.3 \leq w < 0.4$	$w \geq 0.4$ 或贯穿裂缝 ($w \geq 0.2$)

害	管片剥落 $r, h / \text{mm}$	$r < 50$ 且 $h < 25$	$50 \leq r < 150$ 或 $25 \leq h < 50$	$150 \leq r < 300$ 或 $50 \leq h < 100$	$r \geq 300$ 或 $h \geq 100$
---	----------------------------	---------------------	--------------------------------------	--	-----------------------------

表 2 （续）

病害类型		病害级别			
		IV级	III级	II级	I级
变形病害	通缝管片收敛变形(直径变化量) $c / \% D^{\star}$	$c < 4$	$4 \leq c < 9$	$9 \leq c < 12$	$c \geq 12$
	错缝管片收敛变形(直径变化量) $c / \% D^{\star}$	$c < 5$	$5 \leq c < 12$	$12 \leq c < 16$	$c \geq 16$
	纵向相对变形 k	$k < 1/7500$	$1/7500 \leq k < 1/3750$	$1/3750 \leq k < 1/1875$	$k \geq 1/1875$
	管片错台 Δ / mm	$\Delta < 10$	$10 \leq \Delta < 15$	$15 \leq \Delta < 20$	$\Delta \geq 20$
	接缝张开 δ / mm	$\delta < 8$	$8 \leq \delta < 15$	$15 \leq \delta < 20$	$\delta \geq 20$
	道床脱空	道床和管片间出现裂缝	道床和管片间局部出现微剥离	道床和管片间多处出现剥离, 局部存在翻浆冒泥	道床和管片间产生严重剥离, 翻浆冒泥
不同地区的地质情况不同、不同地铁线路的盾构隧道管片结构型式不同, 在实际应用中, 可在上表基础上进行调整, 根据自身特点开展地铁盾构隧道结构病害分级判定工作。 注 1: 对于“威胁”、“已经影响”或“严重影响”运营安全的以下病害, 应判定为 I 级: ——渗漏病害, 渗漏水影响触网或重要信号设备时; ——破损病害, 破损物存在侵限危险或顶部松动存在掉落危险; ——变形病害, 变形量存在侵限危险。 注 2: 符合下列条件时, 病害级别应提高一级, 病害等级为 I 级时不再提高: ——病害发展趋势为“迅速”或“较快”时; ——管片裂缝条数较多, 且裂缝多为贯通性裂缝。 注 3: 符合下列条件时, 病害级别可酌情降低一级, 病害等级为 IV 级时不再降低: ——病害常相伴发生, 如仅单项指标超标, 且经评估隧道安全性、适用性和耐久性状态较好; ——所处地层条件较好, 且经评估隧道安全性、适用性和耐久性状态较好。 注 4: 材料劣化病害严重程度宜通过耐久性专项评估确定。					
[*] 盾构管片收敛变形控制指标除受管片外径、管片拼装方式影响外, 还受管片厚度、接头形式、地层地质等因素影响。					

5.6 材料劣化根据病害特点分为混凝土碳化、有害离子侵蚀、锈蚀等。

5.7 地铁盾构隧道结构病害除主要病害外, 其他病害包括道床受损、管线受损、设备设施受损等, 其病害级别根据对结构安全和运营安全的影响程度确定。

6 设计

6.1 一般规定

6.1.1 地铁盾构隧道结构修复加固设计前，应系统检查地铁盾构隧道结构现状，检查项目一般包括：渗漏、破损、变形、材料劣化等，根据检查结果对管片结构受力、隧道限界及纵断面线型等进行验算，并按表 1 和表 2 进行病害分级。

6.1.2 地铁盾构隧道结构修复加固设计应采取改善结构受力的措施，使其满足衬砌结构承载力以及安全性、适用性和耐久性的要求，不应低于原有技术标准。

6.1.3 管片初始状态受力计算应符合下列规定：

- 衬砌厚度不足时，应按隧道衬砌的实际厚度进行计算；
- 按实际材料性能参数、几何尺寸进行计算；
- 结构存在贯穿裂缝可采用“塑性铰”模拟，钢筋混凝土衬砌受拉区开裂，开裂部分拉应力全部由钢筋承担，混凝土应采用有效面积进行计算；
- 采用荷载-结构模型，并考虑地层对隧道变形约束作用的弹性反力；
- 结合病害程度，采用修正惯用法或梁-弹簧模型法。当管片变形较小时，可采用修正惯用法；当管片变形较大时，宜采用梁-弹簧模型法，考虑接缝刚度的变化；
- 当隧道收敛变形较小时，钢筋混凝土管片可采用弹性本构方程；否则，宜采用弹塑性本构方程。

6.1.4 地铁盾构隧道结构修复加固设计应符合以下原则：

- 根据不同的病害类型，结合地铁盾构隧道所处的地质条件、使用环境，制定针对性修复设计方案，修复后的隧道应具有一定的变形裕量；
- 当同一环管片出现多种病害时，应明确不同病害的修复工序及开展下一病害修复施工的前置条件；一般宜遵循先治理破损及渗漏、后治理变形的原则。钢环等管片内衬加固，应在其他修复措施完成且隧道变形稳定后方可实施；
- 对于已开通运营（含初期运营）的隧道，修复设计方案需结合运营管理部门意见以及实际可施工时间综合确定；
- 对于未开通运营的隧道，修复设计方案须考虑运营后的正常检修及维保；
- 避免或减少对既有结构的损伤，新老结构连接应确保整体受力；
- 保证道床两侧为明排水沟。

6.1.5 需对变形病害采取修复加固措施后的隧道结构进行受力性能分析，以保证其具有足够的刚度及延性。

6.1.6 成型隧道结构变形病害修复后的受力计算应符合下列规定：

- 基本规定符合 6.1.3；
- 采用钢环等管片内衬加固形式时，内衬加固与管片之间的粘结作用宜考虑采用弹簧模拟法。

6.2 渗漏病害修复设计

6.2.1 地铁盾构隧道结构渗漏病害修复以满足隧道防水等级为目标，采取“突出重点，堵排结合、区别对待”的治理措施。治理后，要求隧道满足二级防水等级要求，即：

- 顶部不允许滴漏，其它不允许漏水；
- 结构表面可有少量湿渍，总湿渍面积不应大于总防水面积的 2 %；
- 隧道任意 100 m²防水面积上的湿渍不超过 3 处，单个湿渍的最大面积不大于 0.2 m²；
- 隧道工程中漏水的平均渗漏量应不大于 0.05 L/m²·d，任意 100 m²防水面积渗漏量应不大于 0.15 L/m²·d。

6.2.2 渗漏病害的修复措施包括快速封堵、嵌填密封、注浆止水、壁后注浆，不同接缝位置渗漏病害的修复方式按表 3 执行。

表 3 地铁盾构隧道结构渗漏病害修复措施

修复措施	渗漏部位			
	管片环、纵缝及螺栓孔、注浆孔	隧道进出洞口段	隧道与连接通道相交部位	道床以下管片接头
注浆止水	★	★	★	★
壁后注浆	△	△	△	★
快速封堵	△	—	—	—
嵌填密封	△	△	△	—
注：★宜选、△可选、—不适用，可根据病害特点组合选取多种修复措施。				

6.2.3 对于潮湿而无明水（湿渍）的环、纵缝宜采取嵌填密封处理；对于有渗漏明水（渗水、滴漏）的环、纵缝宜采取注浆止水；对于因变形病害引发的渗漏病害，有条件时，宜先进行壁后注浆；渗漏病害修复应符合JGJ/T 212 的规定。

6.2.4 渗漏病害修复所选用的材料应符合下列规定：

- 材料应适应施工现场环境条件；
- 材料应与原防水材料相容，并应避免对环境造成污染；
- 材料应满足工程的特点、使用功能要求。

6.2.5 地铁盾构隧道结构渗漏处理宜选用亲水环氧树脂浆液、丙烯酸盐浆液等注浆材料。丙烯酸盐浆液不得用于有补强要求的工程。除应急抢险和壁后注浆外，盾构隧道内永久修复慎用聚氨酯灌浆材料。

6.2.6 结构变形缝处渗漏时，采用的堵漏材料应满足变形缝受力性能要求。

6.2.7 若联络通道钢管片与混凝土管片环缝渗漏严重（滴漏或线漏）则可考虑利用在混凝土管片上的预留注浆孔进行壁后注浆方式堵漏。若垂珠、湿渍、渗水则采用骑缝堵漏方式进行注浆堵漏。

6.3 破损、变形病害修复设计

6.3.1 破损病害的修复措施包括涂抹封闭、灌浆法、填充法、无筋嵌填修补、有筋嵌填修补、钢内衬加固，不同类型破损病害的修复方式按表 4 执行。

表 4 地铁盾构隧道结构破损病害修复措施

修复措施	破损类型				
	管片裂缝			管片剥落	
	$W < 0.2 \text{ mm}$	$0.2 \text{ mm} \leq W < 1.0 \text{ mm}$	$W \geq 1.0 \text{ mm}$	拱顶范围	其余位置

涂抹封闭	★	—	—	—	—
灌浆法	△	★	—	—	—

表 4 （续）

修复措施	破损类型				
	管片裂缝			管片剥落	
	$W < 0.2 \text{ mm}$	$0.2 \text{ mm} \leq W < 1.0 \text{ mm}$	$W \geq 1.0 \text{ mm}$	拱顶范围	其余位置
填充法	—	△	★	—	—
无筋嵌填修补	—	—	—	—	★
有筋嵌填修补	—	—	—	★	★
复合材料/钢内衬加固	—	△	△	△	△
注 1：★宜选；△可选、—不适用；可根据病害特点组合选取多种修复措施。 注 2：管片剥落中“拱顶位置”指对应拱顶 66° 范围，即行车受影响范围。 注 3：当病害级别为 I 级时，有条件时，建议采用“钢内衬加固”修复措施。					

6.3.2 拱顶范围的破损病害修复应确保修复材料与原结构的有效结合，严禁因修复材料坠落影响地铁运营安全。

6.3.3 变形病害的修复措施包括地表卸载、洞外注浆、洞内注浆、钢内衬加固，不同程度变形病害的修复方式按表 5 执行。

表 5 地铁盾构隧道结构变形病害修复措施

修复措施	病害类型				
	横断面收敛变形	纵断面相对变形	管片错台	接缝张开	道床脱空
地表卸载	△	—	—	△	—
洞外注浆	★	★	△	△	△
洞内注浆	△	△	△	△	★
复合材料/钢内衬加固	★	—	★	★	—
注 1：★宜选；△可选、—不适用；可根据病害特点组合选取多种修复措施。 注 2：洞内注浆分为洞内道床底注浆和洞内隧道外注浆。 注 3：当病害级别为 I 级时，有条件时，应至少选择一项★标注的修复措施。					

6.3.4 地表卸载宜通过卸荷比计算，并应满足隧道抗浮要求。

6.3.5 采用环向内衬加固方案时，应采取有效措施保证环向内衬与既有结构形成叠合结构；加固之前应对既有结构进行基面处理，内衬加固除满足限界及承载性能要求外，尚需满足防腐、防火、防坠落、防杂散电流等要求。

- 6.3.6 钢内衬加固根据地铁盾构隧道铺轨及下半环钢环预留情况，分为“全断面钢环”和“钢环+牛腿”两类。当采用“钢环+牛腿”设计时，需确保牛腿的做法既满足承载力要求，又满足道床两侧明排水沟及检修要求。
- 6.3.7 根据变形病害发生的位置，钢内衬加固又分为“骑缝环”和“环面环”两类。当收敛变形超限时，应采用“环面环”；当环缝错台超限时，应采用“骑缝环”；当收敛变形与环缝错台同时超限时，应采用“全环钢环”（即“环面环”+“骑缝环”）的方案，但为保证隧道纵向的柔性，不得形成通长的全环钢环加固。
- 6.3.8 钢内衬与钢筋混凝土管片通过刚性环氧树脂及锚栓连接，锚栓定位应避开手孔、环缝、纵缝、主筋等位置。钢环安装后，应尽量避免在钢环上进行焊接，防止高温影响环氧树脂粘结效果。

6.4 其他病害修复设计

- 6.4.1 轨道出现道床板离缝、轨枕与道床板间离缝等现象时应及时采取加固措施，道床板离缝采取注浆加固措施时，注浆孔宜位于道床中部，遇道床缝时适当调整，并避开道床钢筋；注浆前应清除道床下方积水，注浆材料宜选用亲水环氧树脂灌浆材料。
- 6.4.2 当联络通道长期沉降未稳定时，需利用预埋注浆管对联络通道底部进行少量多次的注浆。
- 6.4.3 当联络通道与管片搭接处出现渗漏水时，需根据 6.2 的渗漏水治理方案进行处理。

7 施工

7.1 一般规定

- 7.1.1 施工前由设计单位向修复项目参建单位进行设计交底及答疑。施工单位根据修复设计文件要求编制施工组织设计，并对施工人员进行培训及安全技术交底，特殊工种应持证上岗。
- 7.1.2 施工前应编制地铁盾构隧道结构及设施设备风险防范措施，加强对地铁盾构隧道结构和周边环境的监测和检测，并做好记录。
- 7.1.3 隧道洞内修复施工前，应做好隧道内原有管线和其他设施设备的移位和保护工作。

7.2 渗漏病害修复施工

- 7.2.1 渗漏病害处理程序一般包含基层处理、快速封堵、隧道嵌缝和注浆堵漏等工序。
- 7.2.2 先清理基层，除去表面的酥松、起皮和杂质。
- 7.2.3 快速封堵宜先嵌填速凝型无机防水堵漏材料，再用聚合物水泥砂浆进行找平。
- 7.2.4 嵌填密封作业前应清理待嵌填沟槽，并涂刷与密封材料相容的基层处理剂；背衬材料预留深度应满足设计要求；密封材料应做到连续、均匀、密实、饱满，与基层粘结牢固。
- 7.2.5 嵌填密封应在无水条件下进行，宜按图 1 进行。

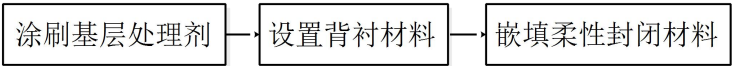


图 1 嵌填密封工艺图

- 7.2.6 注浆止水宜先封堵再注浆，宜从拱底到拱顶，从中间到两侧的顺序进行；渗漏病害严重时，采用钻斜孔注浆，否则可采用骑缝注浆；注浆嘴间距不宜大于 1.0m。
- 7.2.7 斜孔注浆，钻孔斜度与砗面成 45° ~ 65°，孔深略超出裂缝垂直面，孔间距约 15cm~50cm。注

浆宜以低压慢注的方式进行，对于一次钻孔注浆，注浆压力应控制为 0.2 MPa~0.4 MPa；对于二次钻孔注浆，第一次注浆压力应控制为 0.1 MPa~0.5 MPa，第二次注浆压力应控制为 0.5 MPa~0.8 Mpa；当压力保持 5 min无明显降低时可结束注浆。

7.2.8 骑缝注浆的注浆压力应控制为 0.1 MPa~0.5 MPa；待浆液贯通后封管加压至 0.5 MPa，且压力保持 5 min无明显降低时可结束注浆。

7.2.9 管片壁后注浆的注浆压力不宜超过 0.3 MPa，应根据注浆工艺、隧道埋深、地质条件及现场情况确定每孔注浆量。

7.2.10 使用壁后注浆法，注浆嘴应配备防喷装置，宜按图 2 进行。



图 2 壁后注浆工艺图

7.2.11 渗漏病害修复材料性能指标可参照附录A。

7.3 破损、变形病害修复施工

7.3.1 破损病害修复前，应先进行结构渗漏处理，并将破损基面的尘土等杂质清理干净，不得有残留杂物；修复材料不得混入碎块、灰尘等杂物。

7.3.2 破损病害修复时，作业的环境温度不应低于 0℃，混凝土修补表面含水率不应大于 70%。

7.3.3 涂抹封闭宜按图 3 进行。



图 3 涂抹封闭工艺图

7.3.4 灌浆法宜按图 4 进行。



图 4 灌浆法工艺图

7.3.5 填充法应在规定时间内完成填充，应采用结构胶粘剂填实破损、孔洞等间隙。

7.3.6 填充法宜按图 5 进行。

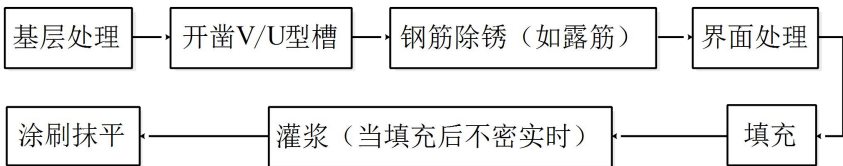


图 5 填充法工艺图

- 7.3.7 植筋钻孔深度宜为 50 mm，钢筋露出管片破损面长度不少于 50 mm，植筋孔位布置应由孔洞中心向外扩散，间距不应大于 200 mm。
- 7.3.8 植筋和钢丝网的位置允许偏差为±50 mm，钢丝网的尺寸允许偏差为±20 mm。
- 7.3.9 无筋嵌填修补宜按图 6 进行。



图 6 无筋嵌填修工艺图

- 7.3.10 有筋嵌填修补中植筋钻孔深度不小于 5 cm，斜角植入，宜按图 7 进行。

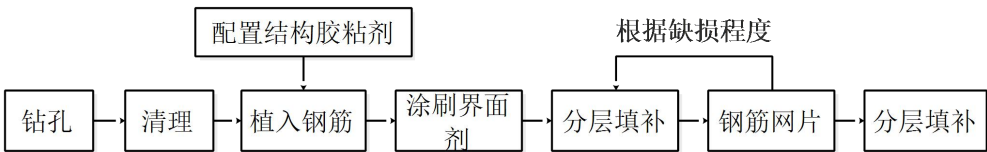


图 7 有筋嵌填修补工艺图

- 7.3.11 盾构隧道采用钢内衬加固前，应完成隧道渗漏病害修复、破损剥落病害修复，封堵手孔，原管片预留注浆孔位置应留孔。
- 7.3.12 钢内衬加固施工应按设计要求进行，钢内衬加固施工顺序和要求可参考附录B。
- 7.3.13 钢内衬加固完成后应定期检查。
- 7.3.14 洞内道床底注浆应采用亲水环氧树脂灌浆材料，对道床与管片之间空隙进行填充。
- 7.3.15 洞内道床底注浆宜从道床较低点向较高点进行，低点为压浆口，高点为出浆口。
- 7.3.16 洞内道床底注浆钻孔前，应对道床尺寸进行精确测量，钻孔过程中严格控制钻孔深度，不得影响隧道结构安全。
- 7.3.17 洞内道床底注浆钻孔完毕后埋设注浆管，可根据加固情况进行多次注浆，施工过程中加强对轨道几何尺寸测量，以保证轨道线性要求。
- 7.3.18 洞外注浆和洞内隧道外注浆，宜采用微扰动注浆工艺。
- 7.3.19 洞外注浆和洞内注浆前，应调查隧道结构位置、地下管线、周边建构筑物、地质条件、地下水、隧道衬砌形式及配筋等情况。
- 7.3.20 洞内隧道外注浆一次钻孔深度应根据现场测定的道床及排水沟尺寸确定，一次钻孔不得钻穿管片，开孔后管片保留厚度不应小于 50 mm。
- 7.3.21 洞内隧道外注浆防喷装置应安装牢固，不应出现松脱或漏浆。
- 7.3.22 一次钻孔应避开管片主筋、横缝和纵缝等接缝部位。
- 7.3.23 洞内隧道外注浆单孔应按照“自上而下，依次搭接”的原则进行分层注浆，分层高度根据隧道沉降实际情况确定。
- 7.3.24 洞内隧道外同孔注浆间隔时间不宜少于 24 h，洞外注浆相邻环注浆间隔时间不宜少于 24 h。
- 7.3.25 洞内隧道外注浆管片部位封孔应在注浆管不漏水情况下进行，孔内应采用亲水环氧树脂灌浆材料填充，孔口宜采用铸铁闷头或钢闷头封堵，并进行水密处理。道床部位封孔宜采用混凝土填充，强度不低于C40。
- 7.3.26 洞内隧道外注浆宜按图 8 进行。

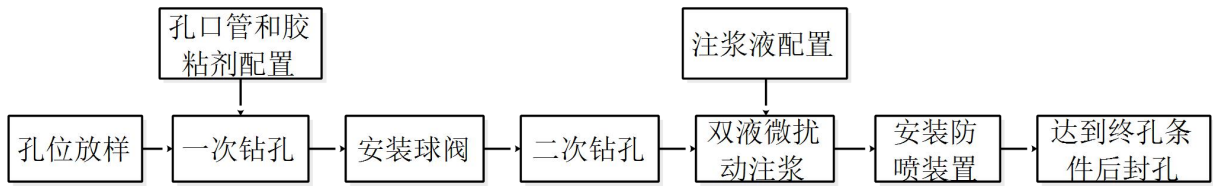


图 8 洞内隧道外注浆工艺图

- 7.3.27 洞外注浆孔的位置、深度、隧道变形控制值应符合设计要求。
- 7.3.28 洞外注浆钻导孔应采用扰动小、成孔效果好的钻孔设备，钻取深度应根据地层、隧道沉降和隧道收敛变形等情况确定，施工过程中钻杆垂直度不应大于 1 %。
- 7.3.29 洞外注浆宜按图 9 进行。

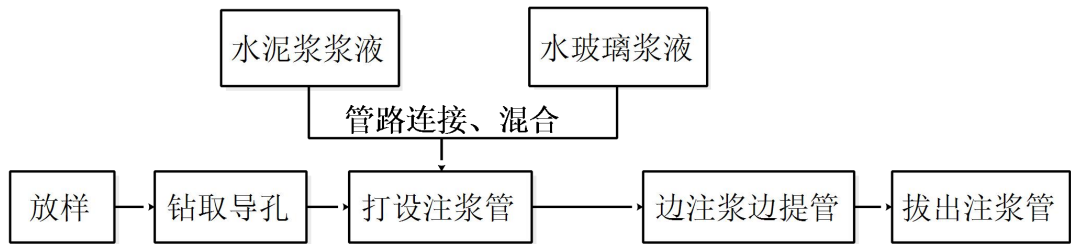


图 9 洞外注浆工艺图

- 7.3.30 破损、变形病害修复材料性能指标可参照附录C。
- 7.4 其他病害修复施工
- 7.4.1 当变形缝填塞物脱落时，在进行修补前，应及时清除变形缝内杂物。
- 7.4.2 当联络通道与管片搭接处出现渗漏水时，渗漏病害修复施工应符合JGJ/T 212 的规定。

7.5 应急处理

- 7.5.1 当隧道病害等级达到 I 级后，现场应立即成立应急救援领导小组，组织、指挥、协调突发事件的应急处理救援工作。
- 7.5.2 应急处理期间，监测单位根据现场工况对隧道变形、病害情况和地面环境等进行重点监测和巡查，监测频率不宜小于 2 次/小时。应急处理完成后，专项修复施工前，可根据实际情况，降低监测频率。
- 7.5.3 应遵循“快处置、保运营”的原则，根据病害发展情况、周边环境条件，采取合适的处置方案，防止发生次生灾害，应以临时（快速）处置措施稳定隧道结构变形，优先满足电客车降级运营条件。
- 7.5.4 可采取隧道内临时支撑、隧道外双液注浆等方式对隧道变形进行应急处置；对于隧道或隧道保护区内结构突发的渗漏水，可采取洞外注浆、洞内注浆止水的方式进行应急处置，注浆材料宜为油溶性聚氨酯或双液浆。
- 7.5.5 如遇地质资料不符、地下障碍物影响和不可抗拒外界因素等情况影响施工时，应及时调整处理方案，防止次生灾害的发生。
- 7.5.6 应急处理完成后，由设计单位进行专项修复设计，并由专业修复施工单位进行施工，以保证隧

道结构的刚度和耐久性。

8 质量检验与验收

- 8.1 隧道病害修复验收应符合GB 50300 的有关规定。
- 8.2 隧道病害修复材料应具有产品合格证和质量检验报告，并应按规范要求进行现场抽样复验。
- 8.3 隧道修复视为一个单位工程，根据修复加固材料种类和施工技术特点划分为分部工程和分项工程，划分方式宜按表 6 采用。

表 6 地铁盾构隧道结构病害修复分部、分项工程划分

单位工程	分部工程	分项工程	检验批划分
地铁盾构隧道 结构病害修复 加固工程	渗漏病害修复	注浆止水、壁后注浆、快速封堵、嵌填密封	每次作业数或每 5 环
	破损病害修复	界面处理、涂抹封闭、灌浆法、填充法、植筋、嵌填修补、表面修整	每次作业数或每 5 环
	钢内衬加固	管线改排、界面处理、道床凿除、钢构件加工与制作、钢内衬安装与焊接、防腐、填充粘结	每环
	地表卸载	地表卸载	每区段
	洞内外注浆	洞内道床底注浆、洞内隧道外注浆、洞外注浆	每次作业数或每 5 环

- 8.4 地铁盾构隧道结构病害修复施工过程中应建立各道工序的自检、交接验收和专项检查验收制度，应保存完整的检查验收记录；上道工序未验收合格，不得进行下道工序施工；工程质量最终验收应在施工单位自行检查评定合格的基础上进行。
- 8.5 单位工程竣工验收时，应提供下列条件和记录：
 - 隧道限界确认文件、监测数据及分析文件；
 - 隧道修复加固工程竣工图纸及相关设计文件；
 - 施工单位、监理单位、监管单位的施工质量管理检查记录；
 - 有关安全及功能的检验和见证检测项目记录；
 - 有关外观质量检验项目检查记录；
 - 分部工程所含各分项工程质量验收记录；
 - 隐蔽工程检验项目检查验收记录；
 - 原材料、成品质量合格证明文件、中文标识及性能检测报告；
 - 修复加固工程质量问题的处理记录及验收记录；
 - 重大质量、技术问题实施方案及验收记录；
 - 现场施工过程影像资料；
 - 其他有关文件和记录。
- 8.6 隧道渗漏修复施工质量应满足设计防水等级要求，并应满足GB 50208 和JGJ/T 212 的有关规定。

- 8.7 破损病害修复材料配置和搅拌时间应符合设计要求和产品说明书，配置后应在规定时间内使用。
- 8.8 破损病害修补后管片表面平整度不应大于 5 mm，且不应出现明显突出部位。
- 8.9 修补完成后，应对管片表面进行清理，不应有浆液等杂物残留，并做好标记，定期检查和养护。
- 8.10 钢内衬加工成型出厂前应进行整体的除锈及内弧面防腐处理，钢内衬内弧面防腐喷涂厚度应满足设计要求。
- 8.11 钢内衬加固所采用的膨胀螺栓及化学锚栓拉拔测试应符合设计要求。
- 8.12 钢环板分块之间的纵缝、环缝对接高差应符合GB 50205 中的规定且满足设计要求。膨胀螺栓和化学锚栓的露出钢内衬表面长度应符合GB 50205 中的规定且满足设计要求。
- 8.13 钢内衬封边时应封堵严实并埋设注浆管，封边表面应平整无明显凹凸。
- 8.14 钢内衬板分块锚固所用膨胀螺栓及化学锚栓的尺寸、埋设深度、锚固数量等均应符合设计要求。
- 8.15 洞内道床底注浆应严格按照设计要求进行布孔，钻孔前操作人员对道床进行量测，明确钻孔深度，钻孔过程中严格控制钻孔深度，并做好记录，不得影响隧道结构安全。
- 8.16 洞内隧道外注浆和洞外注浆停止应以隧道线型及变形情况为准，并满足设计要求。
- 8.17 洞内隧道外注浆和洞外注浆，注浆效果检验应在注浆结束后 28 天且隧道结构稳定后进行。
- 8.18 若联络通道钢管片、连接螺栓等金属构件出现锈蚀问题时应及时进行除锈处理，处理后的材料表面不应有焊渣、焊疤、灰尘、油污、水和毛刺等，然后进行防腐处理。

9 检测和监测

9.1 检测

- 9.1.1 地铁盾构隧道结构病害修复加固前应进行病害检测，修复加固后应进行跟踪巡检。
- 9.1.2 修复前病害检测应根据病害类型定量描述病害程度、发展趋势，修复前病害检测项目和内容应包含表 5.5 病害分级标准中各定量指标，并应满足表 7 要求。

表 7 地铁盾构隧道结构病害修复前病害检测的项目和内容

检测项目		检测内容
渗漏病害	湿渍	病害区间内湿渍数量；各湿渍的面积和分布
	渗水	病害区间内渗水点数量和渗水平均速率；各渗水点的渗水面积、渗水速率和分布；渗水是否浑浊
	滴漏	病害区间内滴漏点数量和滴漏平均速率；各滴漏点的漏水速率；滴水是否浑浊
	线漏	病害区间内线漏点数量和线漏的平均速率；各线漏点的漏水速率；线漏水是否浑浊
	漏泥沙	病害区间内漏泥沙病害的数量和平均速率；各漏泥沙病害的速率；泥水体积比
破损病害	管片裂缝	病害区间内裂缝数量、分布；各裂缝长度、宽度、深度
	管片剥落	病害区间内剥落（缺角、掉块、松动）数量、分布； 各剥落（缺角、掉块、松动）病害的形状、面积和最大剥落深度
变形病害	收敛变形	病害区间内逐环全断面变形数据

检测项目		检测内容
	纵向相对变形	病害区间内纵面段变形数据
	管片错台	病害区间内错台的数量、分布；各错台病害的错台量
	接缝展开	病害区间内接缝张开的数量、分布；各接缝展开病害的张开量
	道床脱空	道床两侧和管片间剥离程度、道床底与管片的脱空程度、是否存在翻浆冒泥情况

- 9.1.3 修复前病害检测除应包括表 7 各项常规病害外，尚应包括：混凝土的碳化深度，道床破损的位置、面积和深度；螺栓、钢筋和钢构件的锈蚀程度；管线及支架的健康状况等。
- 9.1.4 修复后跟踪巡检应根据修复前检测报告和修复设计文件、施工文件对各项病害的治理效果进行跟踪巡检，跟踪巡检应参考表 7 给出各病害的发展趋势。
- 9.1.5 修复前病害检测和修复后病害巡检应由专业单位完成，并形成检测报告；修复前检测报告作为修复专项设计和修复施工的原始资料。

9.2 监测

- 9.2.1 地铁盾构隧道结构病害等级为Ⅰ级、Ⅱ级时，修复施工过程中应进行监测；地铁盾构隧道结构病害等级为Ⅲ级时，修复施工过程中宜进行监测；修复施工完成后应跟踪监测到隧道各项指标达到稳定。
- 9.2.2 修复监测项目、监测点布设应满足修复工作要求，不同的治理措施视实际按表 8 选取检测项。

表 8 地铁盾构隧道结构修复监测项目和测点布设

序号	监测项目		监测点布设	监测断面间距
1	隧道结构	竖向位移	拱顶布设	按修复内容确定
2		水平位移	两侧布设	按修复内容确定
3		净空收敛	水平向布设	按修复内容确定
4		道床竖向位移	道床两侧布设	按修复内容确定
5		管片裂缝宽度	典型管片裂缝位置	按病害分布确定
6		管片错台量	典型管片错台位置	按病害分布确定
7		管片接缝张开量	典型管片接缝张开位置	按病害分布确定
8	周边环境	地表沉降	隧道正上方及外边线两侧各 50 m 范围内布设	5~10 m
9		地下水位	各地下水层分层布设	15~25 m
10		土体分层竖向位移	各岩土层的中部布设	按修复内容确定
11		土体深层水平位移	各岩土层的中部布设	按修复内容确定

- 9.2.3 修复监测频率应根据修复内容确定，洞内外注浆监测频率不宜小于 2 次/小时，其他修复宜根据

修复内容确定；监测报警值与控制值根据修复设计文件确定。

9.2.4 当遇到下列情况时，应提高监测和巡视频率：

- 监测数据超过预警控制值；
- 地表、建（构）筑物等周边环境因不均匀沉降产生破损；
- 隧道周围存在邻近施工、超载和振动作业；
- 暴雨、长时间连续降雨或隧道内因漏水导致洞内积水。

9.2.5 当出现以下警情之一时，必须立刻预警。

- 监测数据超过预警控制值；
- 隧道地表出现开裂、坍塌、隆起等现象；
- 隧道内部结构变形持续增大、裂缝显著发展、漏水现象明显；
- 根据现场经验判断，出现其它需要报警的情况。

9.2.6 监测期间应及时提交监测简报、警情快报、阶段性报告和总结报告，报告内容根据GB 50911 要求执行。

附 录 A
(资料性)
渗漏病害修复材料性能建议指标

A.1 聚合物水泥防水砂浆物理力学性能

快速封堵宜选用速凝型聚合物砂浆或速凝型无机防水堵漏材料。聚合物水泥砂浆应满足JC/T 984 规定，其物理力学性能应满足表A.1 的要求，无机防水堵漏材料应符合GB 23440 规定，物理力学性能应满足表A.2 要求；油溶性聚氨酯应符合JC/T 2041 规定，物理性能指标应满足表A.3 要求。

表 A.1 聚合物水泥防水砂浆物理力学性能 (PCMW)

序号	项目		性能指标要求
1	凝结时间	初凝/min	≥45
		终凝/h	≤12
2	拉渗压力/MPa	7 d	≥1.0
		28 d	≥1.5
3	抗压强度/MPa	28 d	≥24.0
4	抗折强度/MPa	28 d	≥8.0
5	压折比		≤3.0
6	粘结强度/MPa	7 d	≥1.0
		28 d	≥1.2
7	耐碱性 10%NaOH 溶液浸泡 14d		无开裂、剥落
8	耐热性 100 ℃水，5 H		无开裂、剥落
9	抗冻性-冻融循环：（-15 ℃~+20 ℃），25 次		无开裂、剥落
10	收缩率/%	28 d	≤0.15

表 A.2 无机防水堵漏材料物理力学性能 (FD II)

序号	项目		性能指标要求
1	凝结时间/min	初凝/min	≤5
		终凝/h	≤10
2	抗压强度/MPa	1 h	≥4.5
		3 d	≥15.0
3	抗折强度/MPa	1 d	≥1.5
		3 d	≥4.0
4	试件抗渗压力/MPa	7 d	≥1.5

表 A.2 (续)

序号	项目		性能指标要求
5	粘结强度/MPa	7 d	≥ 0.6
6	耐热性	100 ℃, 5 h	无开裂、起皮、脱落
7	冻融循环	20 次	无开裂、起皮、脱落

表 A.3 油溶性聚氨酯性能指标表

序号	项目	性能指标要求
1	密度/(g/cm ³)	≥ 1.05
2	黏度/(MPa·s)	$\leq 1.0 \times 10^3$
3	凝固时间/s	≤ 800
4	不挥发物含量/%	≥ 78
5	发泡率/%	≥ 1000

A.2 聚硫密封胶物理力学性能

嵌填密封宜选用聚硫密封胶、弹性环氧胶泥、弹性环氧树脂等材料。聚硫密封胶应满足JC/T483，其物理力学性能应满足表A.4 要求；弹性环氧胶泥性能指标应满足表A.5 要求，弹性环氧树脂应满足表A.6 要求。

表 A.4 聚硫密封胶物理力学性能(N20HM)

序号	项目		性能指标要求
1	密度/(g/cm ³)		规定值 ± 0.1
2	流动性	下垂度(N型), mm	≤ 3
3	表干时间/h		≤ 24
4	试用期/h		≥ 2
5	弹性恢复率/%		≥ 70
6	拉伸模量/MPa	23℃	> 0.4 或 > 0.6
		-20℃	
7	定伸粘结性		无破坏
8	浸水后定伸粘结性		无破坏
9	冷拉-热压后的粘结性		无破坏
10	质量损失率/%		≤ 5

表 A.5 弹性环氧胶泥性能指标

序号	项目		性能指标要求
1	下垂度（垂直）/mm		≤2
2	延伸率/%		≥80
3	粘结强度	与干砧粘结/MPa	>2.0
4		与湿砧粘结/MPa	>1.5
5	硬度/邵氏（A）		>30

表 A.6 弹性环氧树脂性能指标

序号	项目		性能指标要求
1	VOC/(g/L)		<100
2	黏度（25℃）/(MPa·s)		<400
3	粘结强度	与干混凝土粘结/MPa	≥1.5
4		与湿混凝土粘结/MPa	≥1.0
5	延伸率/%		≥80

A.3 环氧树脂灌浆材料性能

注浆止水宜选用亲水环氧树脂灌浆材料。环氧树脂灌浆材料应满足JC/T 1041 的要求，其物理力学性能应满足表A.7 要求；

表 A.7 环氧树脂灌浆材料性能指标表

序号	项目		性能指标要求
1	固含量（%）		≥90
2	浆液密度 / (g/cm ³)		>1.0
3	初始黏度 / (mPa·s)		<200
4	可操作时间/min		>30
5	固化性能		II
6	抗压强度/MPa		≥70
7	拉伸抗剪强度/MPa		≥8.0
8	抗拉强度/MPa		≥15
9	粘结强度	干粘接/MPa	≥4.0
		湿粘接/MPa	≥2.5
10	抗渗压力/MPa		≥1.2
11	渗透压力比/%		≥400

A.4 灌浆材料物理力学性能

A.4.1 灌浆材料选用

壁后注浆宜选用超细水泥灌浆材料、水泥-水玻璃灌浆材料、油溶性聚氨酯灌浆材料、丙烯酸盐灌浆材料。

A.4.1.1 超细水泥灌浆材料物理力学性能

超细水泥灌浆材料物理力学性能应符合表A.8的要求。

表 A.8 超细水泥灌浆材料物理力学性能

序号	项目		性能指标要求	试验方法
1	粒径（4.75 mm方孔筛筛余/%）		≤ 2.0	JC/T 986
2	泌水率/%		0	
3	流动度 /mm	初始流动度	≥ 290	
		30 min流动度保留值	≥ 260	
4	抗压强度/MPa	1 d	≥ 20	
		3 d	≥ 40	
		28 d	≥ 60	
5	竖向膨胀率/%	3 h	0.1~3.5	
		24 h与3 h膨胀率之差	0.02~0.5	
6	对钢筋有无腐蚀作用		无	GB/T 8074
7	比表面积/（ m^2/kg ）	干磨法	≥ 600	
		湿磨法	≥ 800	

A.4.1.2 水泥-水玻璃灌浆材料物理力学性能

水泥-水玻璃灌浆材料：水泥宜选用普通硅酸盐水泥配制浆液，水胶比宜为0.6~1.0；水玻璃模数宜为2.4~3.2，浓度不宜低于30°Be'；水泥浆与水玻璃溶液的体积比可在1:0.1~1:1之间。

A.4.1.3 丙烯酸盐或聚丙烯类注浆材料性能

丙烯酸盐或聚丙烯类应符合JC/T 2037，其浆液物理力学性能应符合表A.9要求，固化物物理性能应符合表A.10的规定。

表A. 9 丙烯酸盐或聚丙烯类注浆材料浆液性能指标表

序号	项目	性能指标要求
1	外观	不含颗粒的均质液体
2	密度/(g/cm³)	生产厂控制值±0.05
3	黏度/(mPa·s)	≤10
4	PH 值	7.0~9.0

表A. 10 丙烯酸盐或聚丙烯类注浆材料固化物性能指标表

序号	项目	固化物性能指标要求	
		I 型	II 型
1	渗透系数(cm/s)	$<1.0 \times 10^{-6}$	$<1.0 \times 10^{-7}$
2	固砂体抗压强度/kPa	≥200	≥400
3	挤出破坏比降	≥300	≥600
4	遇水膨胀率/%	≥30	

附录 B

(资料性)

钢内衬加固施工顺序和要求

B.1 钢内衬加固施工顺序

钢内衬加固施工顺序应按照下列要求进行：

- 隧道断面测量，且隧道变形达到稳定；
- 管线改排、支架等迁改移恢复（如需要）；
- 道床切割及凿除（如需要）、手孔封堵等；
- 钢内衬尺寸测量放样与制作；
- 混凝土管片表面清理、打磨及钢内衬除锈；
- 钢牛腿安装（如需要）；
- 钢环板安装；
- 钢拉板安装（如需要）；
- 钢内衬封边、填充粘结；
- 钢内衬防腐处理；
- 道床、管线与支架恢复（如需要）。

B.2 钢内衬加固施工要求

钢内衬加固施工应符合下列要求：

- 盾构隧道采用钢内衬加固前，应完成隧道渗漏病害修复、破损剥落病害修复，封堵手孔，原管片预留注浆孔位置应留孔；
- 对于混凝土管片上影响钢内衬安装的各种管线、支架等要迁改移并恢复。对于特殊管线支架的迁改移要请地铁相关专业部门或在地铁相关专业部门指导下进行。对于运营地铁隧道内的这些管线、支架等的迁改移必须在当日施工请点内恢复；
- 道床切割及凿除时要确定好相关几何尺寸，不能损害混凝土管片表面；
- 钢内衬尺寸应进行现场的测量放样，确定各个钢内衬板分块的上、下、左、右四周边界控制线。进行钢内衬的细化设计（钢内衬板分块具体详细的几何尺寸应结合现场实际情况测量放样的结果，进行“一一对应”，有针对性“量身定制”式的细化设计），并应符合设计要求。钢内衬加工尺寸允许偏差为 $\pm 2\text{ mm}$ ；
- 钢内衬加工成型出厂前应进行除锈及内弧面防腐处理，钢内衬内弧面防腐喷涂厚度应满足设计要求；
- 钢内衬板制作时应预留螺栓孔及注浆孔，开孔位置应结合隧道现场安装位置实际测量放样确定，开孔尺寸应符合设计要求。同时，针对具有“个性化”独特特征内容的牛腿、封闭环分块、曲率超出设计值的分块、为错开、避让不可拆移支架等特殊钢内衬板分块，需预先采取相应的技术措施，并征得原设计单位同意；
- 钢内衬拼装前，应对隧道衬砌加固范围进行手孔填充、环纵缝处理、管片修补、表面凿平、渗漏水修复等界面处理。界面处理满足设计要求后方可进行钢内衬拼装。并将钢内衬和管片表面的灰尘清理干净；
- 钢内衬正式拼装前，先进行一环的预拼装，以测评拼装效果、控制拼装精度。钢内衬预拼装应包含正式拼装的所有工序；
- 膨胀螺栓及化学锚栓拉拔试验应符合设计要求；
- 钢内衬固定所用膨胀螺栓及化学锚栓的尺寸、埋设深度、锚固数量等均应符合设计要求。化学锚栓锚固前，应清除锚孔内的杂物灰尘；锚栓种植时应避开混凝土管片上的手孔、吊装孔、注

浆孔、管片纵缝以及管片主筋；

- 钢环安装后必须进行成环焊接，焊接方式及质量应符合设计要求。施焊前应清除待焊缝及其两侧各 50 mm 范围内杂物，并打磨至露出金属光泽；
- 钢环拼装完毕后应进行二次防腐处理，防腐材料的选择、防腐层厚度应符合设计要求。
- 钢内衬安装时与混凝土管片间隙不应大于 10 mm。对于当环缝错台超限，采用“骑缝环”安装钢内衬时，钢内衬与混凝土管片间隙应满足设计要求；
- 每块钢内衬板上要预先安装至少上下两个注浆嘴或在钢内衬封边时埋设注浆管，封边时要封堵严实，表面应平整无明显凹凸；
- 分块钢环板之间的纵缝对接高差应小于 1 mm，环缝对接高差应小于 5 mm；
- 钢拉板（如需要）与道床之间、钢内衬板与混凝土管片之间的间隙应用粘结材料填充密实，不应出现漏填充隙；
- 膨胀螺栓和化学锚栓的露出钢内衬表面长度应满足设计要求，且不应大于 30 mm；
- 钢内衬加固工程完成后隧道内空间尺寸应满足设计要求；
- 粘结材料凝固后，安装的注浆嘴或预埋的注浆管应清理干净，不得有残留；
- 钢内衬拼装完毕后，应根据设计要求进行道床恢复、管线恢复（如需要）；
- 钢内衬加固完成后应定期检查。

附 录 C

(资料性)

破损、变形病害修复材料性能建议指标

C.1 水泥基渗透结晶型防水涂料技术要求

涂抹封闭选用水泥基渗透结晶型防水涂料，水泥基渗透结晶型防水涂料应满足GB 18445 的要求，其物理性能应满足表C.1 的要求。

表 C.1 水泥基渗透结晶型防水涂料的物理性能 (CCCW C)

序号	试验项目		性能指标要求
1	外观		均匀、无结块
2	含水率 / %		≤ 1.5
3	细度，筛余 0.63mm/%		≤ 5
4	氯离子含量%		≤ 0.10
5	施工性	加水拌合后	刮涂无障碍
		20 min	刮涂无障碍
6	抗折强度/MPa，28d		≥ 2.8
7	抗压强度/MPa，28d		≥ 15.0
8	湿基面粘结强度/MPa，28d		≥ 1.0
9	砂浆抗渗性能	带涂层砂浆的抗渗压力*/MPa，28 d	报告实测值
		抗渗压力比（带涂层）/%，28 d	≥ 250
		去除涂层砂浆的抗渗压力*/MPa，28 d	报告实测值
		抗渗压力比（去除涂层）/%，28 d	≥ 175
10	混凝土抗渗性能	带涂层混凝土的抗渗压力*/MPa，28 d	报告实测值
		抗渗压力比（带涂层）/%，28 d	≥ 250

表 C.1 （续）

序号	试验项目		性能指标要求
		去除涂层混凝土的抗渗压力/MPa, 28d	报告实测值
		抗渗压力比（去除涂层）/%, 28d	≥175
		带涂层混凝土的第二次抗渗压力/MPa, 56d	≥0.8
*基准砂浆和基准混凝土 28d 抗渗压力应为 $0.4^{+0.0}_{-0.1}$ MPa, 并在产品质量检验报告中列出。			

C.2 环氧树脂灌浆材料性能要求

灌浆法宜采用环氧树脂灌浆材料，应符合 JC/T 1041 的要求。

C.3 环氧树脂砂浆材料性能要求

填充法、无筋嵌填修补和有筋嵌填修补材料宜采用环氧树脂砂浆。环氧树脂砂浆应满足DL/T 5193 的要求。

C.4 植筋与钢丝网规格

有筋嵌填修补中植筋与钢丝网规格宜满足表C.2 要求。

表 C.2 植筋与钢丝网规格表

序号	材料	规格
1	钢筋	钢筋直径宜 6 mm、且应为带肋钢筋
2	钢丝网	钢丝网片，直径宜 0.8 mm~1 mm，网格口径宜 3 cm×3 cm或 5 cm×5 cm

C.5 结构胶粘剂性能要求

结构胶粘剂宜采用亲水类材料，性能指标应满足表C.3 的要求。

表 C.3 结构胶粘剂性能指标

序号	项目	性能指标要求
1	抗压强度/MPa	≥70

2	抗拉强度/MPa	≥40
---	----------	-----

表C.3 （续）

序号	项目	性能指标要求
3	抗弯强度/MPa	≥50
4	抗剪强度/MPa	≥50

C.6 钢内衬加固所采用的钢板、焊接材料要求

C.6.1 钢板材料要求

钢内衬加固所采用的钢板宜选用 16 mm、20 mm、30 mm厚钢板，材质为Q235B、Q345B。

C.6.2 焊接材料要求

- 所采用的焊接材料应满足满足以下要求：
- 焊接材料应与母材相匹配。
 - 焊接采用采用CO2 气体保护焊，具体焊条采用型号按照设计要求。

C.7 钢内衬防腐材料性能指标

钢内衬加固所采用防腐材料宜选用喷涂型聚脲弹性体（SPUR），性能应符合GB/T 23446，性能指标应满足设计要求，宜符合表C.4 要求。

表C.4 钢内衬防腐材料(SPUR)性能指标

序号	项目	性能指标要求	
		I	II
1	涂层厚度/mm	≥1.2	≥1.2
2	拉伸强度/MPa	≥10	≥16
3	断裂伸长率/%	≥300	≥450
4	撕裂强度/（N/mm）	≥40	≥50
5	硬度/A	≥70	≥80

C.8 刚性环氧树脂性能要求

钢内衬加固粘结钢环所采用的刚性环氧树脂应满足GB 50728 的要求。

C.9 双液注浆材料性能要求

- 双液注浆材料应满足以下要求：
- 水泥性能应符合GB 175 的有关规定，拌合用水应符合JGJ 63 的有关规定；
 - 水泥浆水灰比宜控制为 0.6~0.7，注浆宜采用均匀拌制 1 h之内的新鲜浆液，不得离析；

- 水玻璃的波美度宜为 $35^{\circ} \sim 42^{\circ}$ ，模数宜为 2.85~3.20；
- 双液浆比例应考虑快速达到设计加固强度以及施工可操作性要求，应进行小样配比试验，测试初凝时间。水泥浆与水玻璃体积比宜控制为 1.5: 1~3: 1。

C.10 胶粘剂性能要求

隧道内部注浆孔口管与管片粘结所用胶粘剂应符合设计和产品质量要求，应对胶粘剂的粘结强度进行复查检验。

参 考 文 献

- [1] GB/T 3098.6-2014 紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱
 - [2] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范（2015年版）
 - [3] GB 50017-2017 钢结构设计标准（附条文说明[另册]）
 - [4] GB 50108-2008 地下工程防水技术规范
 - [5] GB 50157-2013 地铁设计规范
 - [6] GB 50204-2015 混凝土结构工程施工质量验收规范
 - [7] GB 50367-2013 混凝土结构加固设计规范
 - [8] GB 50446-2017 盾构法隧道施工及验收规范
 - [9] GB/T 50476-2019 混凝土结构耐久性设计标准
 - [10] GB 50490-2009 城市轨道交通技术规范
 - [11] GB 50661-2011 钢结构焊接规范
 - [12] GB 50911-2013 城市轨道交通工程监测技术规范
 - [13] CJJ/T 202-2013 城市轨道交通结构安全保护技术规范
 - [14] CJJ/T 289-2018 城市轨道交通隧道结构养护技术标准
 - [15] JGJ 145-2013 混凝土结构后锚固技术规程
 - [16] JGJ/T 259-2012 混凝土结构耐久性修复与防护技术规程
 - [17] JC/T 482-2003 聚氨酯建筑密封胶
 - [18] SL 105-2007 水工金属结构防腐蚀规范（附条文说明）
 - [19] CECS: 18-2000 聚合物水泥砂浆防腐蚀工程技术规程
 - [20] T/CECS 788-2020 城市轨道交通盾构隧道结构病害检测技术规程
-