

北京市地方标准

DB

编 号：DB11/T 1444-2025

代 替：DB11/T 1444-2017

城市轨道交通隧道工程注浆技术规程

Technical specification for grouting in urban rail
transit tunnel engineering

2025-04-02 发布

2025-07-01 实施

北京市住房和城乡建设委员会
北京市市场监督管理局

联合发布

北 京 市 地 方 标 准

城市轨道交通隧道工程注浆技术规程

Technical specification for grouting in urban rail transit tunnel
engineering

编 号：DB11/T 1444-2025

主编部门：北京城建科技促进会
中建一局集团第五建筑有限公司
北京瑞威世纪铁道工程有限公司

批准部门：北京市市场监督管理局

施行日期：2025年07月01日

2025 北京

前　　言

根据北京市市场监督管理局《关于印发 2023 年北京市地方标准制修订项目计划（第一批）的通知》（京市监发〔2023〕5 号）的要求，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，修订本规程。

本规程的主要技术内容是：1 总则；2 术语和符号；3 基本规定；4 注浆材料与浆液配制；5 超前小导管注浆；6 超前管棚注浆；7 帷幕注浆；8 局部注浆和径向注浆；9 矿山法隧道背后填充注浆；10 盾构法隧道壁后注浆；11 注浆效果检查。

本规程修订的主要内容是：

- 1 将“强制性标准”修改为“推荐性标准”；
2. 增加了“帷幕注浆”、“局部注浆”内容；
- 3 增加了分段后退式注浆、壁后注浆、同步注浆等多个术语，增加信息化、智能化施工要求，增加了注浆材料要求；
- 4 细化了超前小导管、管棚的制作要求、施工质量控制、注浆施工工艺；
- 5 补充了填充注浆的注浆量计算等注浆设计内容。

本规程由北京市住房和城乡建设委员会和北京市市场监督管理局共同管理，北京市住房和城乡建设委员会归口、组织实施，并组织编制单位对本规程技术内容进行解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送北京城建科技促进会（地址：北京市西城区广莲路 1 号建工大厦 A 座 906 室，邮编 100055；电话：010-63965212；电子邮箱：143c@sohu.com）。

本规程主编单位：北京城建科技促进会

中建一局集团第五建筑有限公司
北京瑞威世纪铁道工程有限公司

本规程参编单位：北京市轨道交通建设管理有限公司

北京市政建设集团有限责任公司
北京城乡建设集团有限责任公司
北京建筑大学
北京城建勘测设计研究院有限责任公司
航天规划设计集团有限公司

北京城建轨道交通建设工程有限公司
北京圣洁防水材料有限公司
北京市市政四建设工程有限责任公司
北京建工路桥工程建设有限责任公司
北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司
北京城建集团有限责任公司
北京工业大学
中铁建设集团有限公司
中国建筑第五工程局有限公司

本规程主要起草人员：王建明 王维东 孙国庆 刘 军 谢校亭 郑 昊 朱胜利
马 健 梁 涛 杜 昕 杨 旭 杨应辉 贺美德 郭彩霞
何少春 张礼舜 覃 烨 周一萌 彭 峰 马海燕 冯科明
花延杰 赵 群 刘继尧 闫德刚 潘宏宇 郑文利 汪 健
许厚材 张继昶 陈 伟 付春青 王全贤 田贵中 王书行
张广田 胡 磊 许景昭 杨冬梅 刘 小 屈 洋 梁 钧
张 功 解银虎 邱穆龙 解东贺 胡 敏

本规程主要审查人员：程 峰 叶 峰 何世鸣 王利民 李 玲 方江华 田胜力

目 次

1 总 则	1
2 术语和符号	2
2.1 术 语	2
2.2 符 号	4
3 基本规定	5
4 注浆材料与浆液配制	7
4.1 一般规定	7
4.2 注浆材料	7
4.3 浆液配制	8
5 超前小导管注浆	11
5.1 一般规定	11
5.2 设 计	11
5.3 施 工	12
6 超前管棚注浆	16
6.1 一般规定	16
6.2 设 计	16
6.3 施 工	17
7 帷幕注浆	19
7.1 一般规定	19
7.2 设 计	19
7.3 施 工	21
8 局部注浆和径向注浆	23
8.1 一般规定	23
8.2 设 计	23
8.3 施 工	24
9 矿山法隧道背后填充注浆	25
9.1 一般规定	25
9.2 设 计	25
9.3 施 工	26
10 盾构法隧道壁后注浆	27
10.1 一般规定	27
10.2 设 计	27
10.3 施 工	29
11 注浆效果检查	31
11.1 一般规定	31
11.2 效果检查	31
附录 A 注浆施工记录表	33
本规程用词说明	37
引用标准名录	38
附：条文说明	39

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	4
3	Basic requirements.....	5
4	Grouting material and grout preparation.....	7
4.1	General requirements	7
4.2	Grouting material	7
4.3	Grout preparation	8
5	Ahead ductile grouting	11
5.1	General requirements	11
5.2	Design.....	11
5.3	Grouting	12
6	Advance pipe shed grouting	16
6.1	General requirements	16
6.2	Design.....	16
6.3	Grouting	17
7	Curtain grouting.....	19
7.1	General requirements	19
7.2	Design.....	19
7.3	Grouting	21
8	Local grouting and radil grouting	23
8.1	General requirements	23
8.2	Design.....	23
8.3	Grouting	24
9	Back-fill grouting for mine tunnelling method.....	25
9.1	General requirements	25
9.2	Design.....	25
9.3	Grouting	26
10	Backwall grouting for shield tunneling method.....	27
10.1	General requirements	27
10.2	Design.....	27
10.3	Grouting	29
11	Grouting effect inspection.....	31
11.1	General requirements.....	31
11.2	Effect inspection.....	31
	Appendix A Grouting construction record form.....	33
	Explanation of wording in this specification	37
	List of quoted standards.....	38
	Addition: Explanation of provisions.....	39

1 总 则

1.0.1 为规范北京城市轨道交通隧道工程注浆的设计、施工与效果检查，做到安全可靠、技术先进、经济适用、环境友好，提升注浆效果，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于北京城市轨道交通隧道工程的超前小导管注浆、超前管棚注浆、帷幕注浆、局部注浆、矿山法隧道背后填充注浆和盾构法隧道壁后注浆的设计、施工与效果检查。

1.0.3 北京城市轨道交通隧道工程注浆设计、施工、效果检查除应符合本规程外，尚应符合国家及北京市现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 注浆 grouting

利用气压、液压或电化学原理，把某些能固化的浆液注入土（岩）体的裂隙或孔隙，以改善地层的物理力学性质，达到填充、加固、控制变形、止水等目的的工程作业活动。

2.1.2 超前预注浆 advance core pre-grouting

为提高隧道开挖施工安全性，开挖前对掌子面前方土（岩）体进行的注浆作业。

2.1.3 径向注浆 radial grouting

为控制隧道围岩变形或止水，沿隧道初期支护或二次衬砌垂直布设注浆孔，对隧道周围空间或土（岩）体进行的注浆作业。

2.1.4 补偿注浆 compensation grouting

为控制隧道开挖造成的土体移位，补偿地层损失进行的注浆作业。

2.1.5 帷幕注浆 curtain grouting

为控制隧道围岩变形或止水，在掌子面前方对软岩、富水等不良地层进行超前加固，在隧道开挖面及周边一定范围形成连续的加固或阻水帷幕的注浆作业。

2.1.6 单孔一次性注浆 full hole one-off grouting

注浆施工中，先行将注浆孔钻至预设深度，浆液再从孔口处注入，一次性加固到整个钻孔深度的注浆作业方式。

2.1.7 分段前进式注浆 advance sublevel grouting

在注浆施工中，先钻进一段，进行注浆，再钻进下一段、再次注浆的钻、注交替方式，逐步加固预设地层的注浆作业方式。

2.1.8 钻杆后退式注浆 drill pipe retrograde grouting

在注浆施工中，先钻孔至设计孔深，然后边提钻杆边注浆的注浆方式，包含单管工艺和双管工艺。

2.1.9 分段后退式注浆 retrograde sublevel grouting

在注浆施工中，采用套管或泥浆护壁等成孔工艺，将多孔分段注浆管安设至预加固地层，止浆塞从孔底逐段拔出、逐段注浆的作业方式。

2.1.10 局部注浆 local grouting

在掌子面前方对存在富水或软弱围岩的局部区域，有针对的采取注浆措施，在局部形成一定范围的地层加固或止水作用的注浆作业。

2.1.11 深孔注浆 deep boring grouting

从地面、洞门或隧道内对岩土体进行的注浆孔深度达到 6m 以上的注浆作业。

2.1.12 背后填充注浆 back-fill grouting

为密贴隧道结构，填充隧道初期支护背后、初期支护和二次衬砌之间空隙的注浆作业。

2.1.13 壁后注浆 backwall grouting

用浆液填充隧道衬砌管片环与地层之间空隙的注浆作业。

2.1.14 同步注浆 synchronized grouting

在盾构隧道施工过程中，为防止地层变形、控制地面沉降与管片姿态，与盾构掘进同步，在管片脱出盾尾成环的同时，通过安装在盾构壳体外侧注浆系统向管片与地层之间的空间进行注浆的作业。

2.1.15 二次注浆 secondary grouting

在盾构掘进一定长度后，为进一步提高隧道结构的稳定性和防水性能，通过管片注浆孔向地层进行再次或多次注浆的作业。

2.1.16 扩散半径 diffusion radius

以注浆孔为圆心，单孔注浆作业中浆液有效扩散的距离。

2.1.17 止浆墙 wall for grouting

防止注浆施工中漏浆、跑浆并为深孔注浆作业提供工作面的临时构筑物。

2.1.18 注浆量 grouting volume

注入岩土体工程对象中浆液的体积。

2.1.19 浆液注入率 grout-fill ratio

注入岩土体中浆液的体积与被加固地层中空隙的体积之比。

2.1.20 结石率 solidification ratio

注浆液凝固硬化后形成的结石体的体积与注入浆液原体积的比值。

2.2 符号

P —注浆压力;

Q —注浆设计用浆量;

q —单位时间注浆量;

t —注浆持续时间;

R —浆液扩散半径;

L —注浆段长;

n —地层孔隙率;

α —地层填充系数;

β —浆液损失系数;

Be' —水玻璃的波美度。

3 基本规定

3.0.1 注浆设计前应对工程对象的工程地质条件与水文地质条件、周边环境等进行详细调查，明确注浆目的。

3.0.2 注浆设计应包括工程概况、工程地质条件与水文地质条件、注浆目的、注浆范围、注浆参数、注浆材料、注浆方式、对地质条件及周边环境影响、注浆效果指标等内容。

3.0.3 注浆施工方案应包括工程概况、注浆目的、注浆范围、注浆孔布置图、注浆孔布设参数表、注浆材料及配比、注浆施工方式及工艺、注浆参数、注浆效果检查方法及要求、进度安排、注浆劳动力、机械设备、材料等准备工作、安全质量环境保证措施等内容。

3.0.4 施工前应通过现场注浆试验段验证注浆工艺及参数，现场试验应选择在具有代表性的地段进行，并应根据试验结果进行优化。

3.0.5 注浆材料及浆液应绿色环保，不应对人体、生物与环境造成有害影响，所涉及的安全与环保要求应符合国家标准的规定。不得使用国家和北京市明令禁止的工艺和材料。

3.0.6 在注浆环境敏感、地层复杂的地段，宜使用数字化技术指导注浆施工。

3.0.7 注浆应进行信息化施工。注浆技术应从勘察、设计、施工、监测及反馈进行综合考虑，并将注浆与开挖观测结合起来实现动态化注浆，并应根据施工过程信息反馈调整注浆施工参数，评价注浆效果，指导后续注浆施工。

3.0.8 注浆施工设备应符合下列规定：

1 成孔设备选型应根据注浆对象的工程特点与地质条件、注浆工艺所要求的孔深、孔径等条件确定；

2 浆液泵送设备选型应满足注浆工艺要求，具有调节流量、压力的功能，泵送浆液应能保持均匀稳定，泵压额定能力应大于设计最大注浆压力的 1.5 倍；

3 浆液配制设备生产能力和注浆泵泵送能力应与设计要求的注浆速度相匹配，应能保证不间断稳定浆液供给；

4 双液注浆泵混合器应有单向逆止功能，不应使用三通代替；

5 输浆管应采用高压胶管，高压胶管和阀门能承受的压力应不低于注浆泵额定压力的 1.2 倍；一次注浆和填充注浆用注浆管应能承受不小于 1MPa 的压力；

6 注浆孔口应设置压力表，压力表宜采用抗振型压力表，压力表量程应与高压胶管承压及注浆设计终压匹配；

7 注浆量计量仪表应检定合格；

8 注浆设备宜配备自动注浆记录仪或自动化监控系统，实时连续自动采集、记录施工过程中的注浆压力、流量、速度等注浆参数，并应能将相关参数在注浆自动记录仪上显示及打印输出等功能。

3.0.9 注浆施工前后应进行注浆设备的维修保养工作。注浆前所有注浆管道均应注水润湿；单液浆每作业班组注浆管路应清洗一次，水泥-水玻璃双液浆每作业一次注浆管路应清洗一次。长时间停顿时，应将压浆直管及环管等所有拌浆、注浆设备用水循环泵洗、清空。

3.0.10 注浆过程应根据本规程附录 A 做好钻孔注浆记录，记录每孔的钻孔情况、浆液材料及配比、凝结时间、注浆时间、注浆压力、浆液流量等，并记录注浆过程中发生的异常情况等。

3.0.11 注浆施工归档技术资料包括注浆设计文件、注浆施工方案、注浆施工记录表、注浆施工台账，注浆计量资料、注浆效果检查表、会议纪要，以及相关的洽商纪录和影像资料等。

3.0.12 注浆施工时应确保周边环境安全，并应对地层、周边建构筑物、管线、道路等进行监控量测。

3.0.13 作业前应检查工作面安全状况。

3.0.14 施工过程中应严格按照审批的施工方案和施工组织管理要求开展施工安全风险控制工作，并应符合国家现行标准《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》GB 50652、《城市轨道交通工程建设安全风险技术管理规范》DB11/ 1316 的规定。

3.0.15 隧道内施工作业应满足北京市地方标准《有限空间作业安全技术规范》DB11/T 852 的要求。

3.0.16 绿色施工应符合现行地方标准《绿色施工管理规程》DB11/T 513 的规定。

4 注浆材料与浆液配制

4.1 一般规定

4.1.1 应根据工程所处工程地质条件、水文地质条件和注浆目的合理选择注浆材料，宜选取普通硅酸盐水泥、超细硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、水玻璃等常用注浆材料。

4.1.2 注浆施工前应对设计浆液配比参数进行室内试验和现场试验。

4.1.3 制浆时应严格按照注浆施工方案确定的浆液配合比进行，主料误差不大于 5%，外掺剂不大于 1%。

4.1.4 配制水泥基的浆液时，应防止杂物混入，制浆时应对浆液设网过滤，未经过滤的浆液不得进入泵体。

4.1.5 改性水玻璃单液浆和水泥-水玻璃双液浆不宜在永久性的止水或加固工程中使用。

4.1.6 在要求早强快凝、抗地下水冲散、抗收缩等特殊条件下的注浆工程中，可采用硫铝酸盐水泥基或掺加高性能水泥改性剂的普通硅酸盐水泥注浆材料。

4.1.7 非现场配制的浆液应使用搅拌装置运输，浆液在运输过程中不得出现离析。

4.2 注浆材料

4.2.1 注浆用原材料进场时应具有质量合格证明文件，且应按国家现行标准检验合格后方可使用。

4.2.2 注浆材料用水泥宜采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或复合硅酸盐水泥，水泥质量应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的规定，水泥强度等级不应低于 42.5，有防腐特殊要求时，可采用抗硫酸盐水泥，不得采用高铝水泥。抗硫酸盐水泥应符合现行国家标准《抗硫酸盐硅酸盐水泥》GB/T 748 的规定。采用超细硅酸盐水泥时应符合现行国家标准《超细硅酸盐水泥》GB/T 35161 的规定。

4.2.3 注浆材料用细骨料应选用粒径不大于 2.36mm 的砂子；砂的质量应符合现行国家标准《建设用砂》GB/T 14684 的规定，天然砂的含泥量按重量计不应大于总重量的 3%，机制砂泥块含量不应大于总重量的 1%。采用再生细骨料时应符合国家现行标准《混凝土和砂浆用再生细骨料》GB/T 25176、《再生骨料应用技术规程》JGJ/T 240 或现行北京市地方标准《建筑垃圾再生产产品应用技术规程》DB11/T 1975 的规定。

4.2.4 粉煤灰等级不宜低于 II 级，质量应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 的规定；粒化高炉矿渣粉的质量应符合现行国家标准《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046 的规定。

4.2.5 外加剂的品种、性能应符合现行国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119、《混凝土外加剂》GB 8076 的规定。

4.2.6 注浆材料中使用的外加剂种类及配比参数应通过试验确定，外加剂不得影响浆体与岩土体的粘结。

4.2.7 注浆材料所采用的水玻璃应符合国家现行标准《工业硅酸钠》GB/T 4209、《建筑工程水泥-水玻璃双液注浆技术规程》JGJ/T 211 的规定，模数宜在 2.4~3.4 之间，浓度宜为 30Be'~50Be'。

4.2.8 膨润土宜选用天然钠基膨润土，质量应符合现行国家标准《膨润土》GB/T 20973 的规定，膨胀率宜大于 15%，且 95% 通过 200 目筛。

4.2.9 注浆材料用拌和水的水质应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

4.3 浆液配制

4.3.1 浆液配制时，材料投入顺序应正确，计量应准确；拌和时间应连续，不应间断，搅拌时间、速度应符合规定。

4.3.2 水泥砂浆水胶重量比宜为 0.8:1~1:1，胶砂重量比宜为 1:2。同步注浆时可采用粉煤灰替代部分水泥，粉煤灰用量可根据强度、初凝时间、填充性、和易性等适配确定。对改善注浆料有特殊要求时，可加入一定量的外加剂或外掺料。浆液应搅拌均匀，随搅随用，浆液应在初凝前用完。

4.3.3 单液水泥浆宜由强度等级不低于 42.5 的普通硅酸盐水泥、添加材料和水组成，采用添加材料时宜按表 4.3.3-1 选用。单液水泥浆配制时水、灰用量按配合比计算或按表 4.3.3-2 选用。配制时应先加水后加水泥，并持续搅拌均匀，水泥浆液内应无水泥结块。

表 4.3.3-1 单液水泥浆添加材料选用表

序号	名称	要求	掺量（占水泥质量百分比）
1	食盐	工业品	0.5%~1%
2	水玻璃	40Be'以上	3%~5%
3	高性能外加剂	粉末状	3%~5%
4	粉煤灰	粉末状	10%~30%
5	膨润土	粉末状	10%~30%

表 4.3.3-2 单液水泥浆配制表 (1m³浆液)

水灰比	0.6:1	0.8:1	1:1	1.5:1	2.0:1
水泥 (kg)	1072	883	750	546	429
水 (kg)	643	706	750	819	857

4.3.4 酸性水玻璃浆液宜在水玻璃中加入稀释的酸性物质配制而成。水玻璃宜选用模数 2.8~3.3, 浓度 35Be'以上的水玻璃稀释而成, 稀释的酸性物质可选择磷酸。酸性水玻璃浆液配制应符合下列规定:

1 酸性水玻璃浆液配制时, 第一组分水玻璃浆液浓度宜为 10Be'~20Be', 第二组分稀释的酸性物质浓度宜为 10%~20%;

2 水玻璃的稀释宜采用边加水边搅拌边用波美计测量的方法进行, 也可按下列公式或按表 4.3.4-1 计算出水、水玻璃用后, 将水玻璃加入水中搅拌均匀;

$$V_{\text{原}} = \frac{d_{\text{配}} - 1}{d_{\text{原}} - 1} \cdot V_{\text{配}} \quad (4.3.4-1)$$

$$V_{\text{水}} = V_{\text{配}} - V_{\text{原}} \quad (4.3.4-2)$$

式中: $d_{\text{原}}$ 、 $d_{\text{配}}$ —分别为原水玻璃和预配水玻璃的比重, 水玻璃比重与波美度的关系为 $d = 145 / (145 - Be')$;

$V_{\text{水}}$ 、 $V_{\text{原}}$ 、 $V_{\text{配}}$ —分别为加水、原水玻璃和预配水玻璃的体积。

表 4.3.4-1 水玻璃稀释表

原水玻璃 Be'		40		42		44		45		48		50	
原水玻璃 d		1.381		1.408		1.436		1.450		1.495		1.526	
预配水玻璃		W	S	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S
Be'	d	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
15	1.115	698	302	718	282	736	264	744	256	768	232	782	218
20	1.160	580	420	608	392	633	367	644	356	677	323	696	304
25	1.208	454	546	490	510	523	477	538	462	580	420	605	395
30	1.261	315	685	360	640	401	599	420	580	473	527	504	496
35	1.318	165	835	221	779	271	729	293	707	358	642	395	605
40	1.381	0	1000	66	934	126	874	153	847	230	770	276	724

注: 本表为稀释 1m³水玻璃需要加入的原水玻璃及清水量。W 代表清水, S 代表水玻璃, L 代表体积单位“升”, d 代表液体比重, Be' 代表水玻璃的波美度。

3 浓酸稀释时应先算出所需浓磷量和加水量, 然后将浓酸缓慢倒入水中, 搅拌均匀, 不得将水倒入浓酸中;

4 在快速搅拌情况下, 将水玻璃缓慢倒入稀释酸性物质中, 并用 pH 计或试纸测试 pH 值, 按表 4.3.4-2 控制胶凝时间。

表 4.3.4-2 改性水玻璃胶凝时间表

pH 值	3	4	5	6	6~7
胶凝时间(min)	300	150	100	50	25

注: 1. 浆液采用 15Be'水玻璃和 15% 硫酸配制而成;

2. 浆液胶凝时间为在空气中的胶凝时间, 在潮湿细砂中为 2min~30min。

4.3.5 水泥-水玻璃双液浆液应根据工程需要按本规程第 4.3.3 条、第 4.3.4 条分别配制水泥浆和水玻璃浆。水泥浆、水玻璃的配比应根据胶凝时间、强度、结石率等要求试配确定, 但水泥浆水灰比不宜大于 1:1。双液浆按水泥浆与水玻璃浆体积比 1:1~1:0.6 用双液注浆泵泵送, 在混合器中混合后注入注浆孔, 注浆结束时应先停水玻璃浆液泵, 后停水泥浆液泵。

4.3.6 硫铝酸盐水泥基注浆材料宜根据胶凝时间要求按水灰比 0.8:1~1.2:1 配制, 配置时应先将水加入拌浆桶内, 边搅拌边加入水泥, 搅拌时间不少于 5min。

4.3.7 超细水泥浆宜按水灰重量比 1:1~1.2:1 进行配制。配制时应先将水加入拌浆桶内, 采用高速搅拌机边搅拌边加入水泥, 搅拌时间不少于 5min。

5 超前小导管注浆

5.1 一般规定

5.1.1 超前小导管注浆适用于隧道拱部或侧墙处于自稳能力差的粉土、砂土及卵石土地层。

5.1.2 初期支护结构施工时，宜将格栅钢筋和超前小导管互相焊接形成整体，形成联合支护体系。

5.1.3 每榀格栅安装好后宜在拱脚处设置锁脚锚管固定，锚管尾部应与拱架焊接牢固。

5.1.4 小导管打设及注浆时，应派专人对初期支护的工作状态进行检查。当发现初期支护出现裂缝、变形或损坏时，应立即停止注浆，采取措施。

5.1.5 注浆结束浆液达到设计要求后方可进行掌子面的开挖。

5.1.6 隧道的每循环开挖长度应满足设计要求，设计无要求时，每循环开挖长度应小于小导管的注浆长度，隧道开挖至下一循环附近时宜预留核心土作为小导管施工平台。

5.2 设 计

5.2.1 超前小导管注浆应根据地质条件、环境状况、隧道断面大小及支护结构形式选用不同的设计参数，应包括注浆有效范围、超前小导管长度、间距、外插角、单孔注浆浆液扩散半径、注浆压力、注浆速度、浆液种类、浆液初凝时间、浆液配合比等。

5.2.2 超前小导管宜沿隧道拱部 $120^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内对称均匀布设，环向间距不宜大于 400mm ，单层小导管设计外插角不宜大于 20° ；双排小导管设计时，第一层外插角不宜大于 15° ，第二层外插角宜为 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。两层小导管宜交错布置。

5.2.3 小导管纵向间距应与拱架间距一致。小导管长度应大于 2 倍循环进尺，区间隧道断面、初期支护拱架间距为 $750\text{mm} \sim 1000\text{mm}$ 时，小导管管长不宜小于 3m ；拱架间距为 $500\text{mm} \sim 750\text{mm}$ 时，管长不宜小于 2m 。超前小导管每循环沿隧道纵向水平投影搭接长度不宜小于 1m 。砂层与砂卵石地层宜逐榀打设，管长不宜大于 2m 。

5.2.4 超前小导管宜采用直径 $32\text{mm} \sim 42\text{mm}$ 、壁厚不小于 3.5mm 的钢管制作，长度宜为 $2\text{m} \sim 4\text{m}$ 。卵石土地层及砾石、漂石地层中拱架间距为 500mm 时，小导管可采用长 $1.7\text{m} \sim 2\text{m}$ 、直径 25mm 钢管制作的短导管逐榀打设。

5.2.5 填土层、砂卵石地层宜采用单液水泥浆或水泥砂浆，粉细砂、细中砂地层宜采用改性水玻璃，其余地层宜采用水泥-水玻璃双液浆。

5.2.6 注浆设计用浆量可按公式 5.2.6 计算：

$$Q = V \cdot n \cdot \alpha \cdot \beta \quad (5.2.6)$$

式中: Q —设计用浆量 (m^3);

V —被加固的土体体积 (m^3), 计算单孔注浆量时可按浆液扩散半径形成的柱体体积计算;

n —地层孔隙率, 可按地质勘察报告中给出的地层孔隙率取值, 或按表 5.2.6 取值;

α —地层填充系数, 小导管注浆及径向注浆宜取 0.2~0.5;

β —浆液损失系数, 可取 1.20~1.40。

表 5.2.6 地层孔隙率表

名称	孔隙率 (%)
砂卵石	50~60
冲积中、粗、砾砂	33~46
粉砂	33~49
粉质黏土	35~50
黏土	41~52.4
风化岩	5~45

5.2.7 超前小导管注浆设计参数宜根据地层条件和隧道埋深等确定, 但不宜大于表 5.2.7 规定的值。粉质黏土层或细砂层注浆时注浆速度不宜超过 20L/min。注浆量应根据地层情况按本规程第 5.2.6 条计算确定。注浆参数应根据注浆试验结果及现场情况调整。

表 5.2.7 超前小导管注浆设计参数表

项目	注浆终压	扩散半径	注浆速度
上限值	0.5MPa	250mm	30L/min

5.2.8 小导管施工前可根据地层状况在作业面设置喷射混凝土止浆墙, 止浆墙厚度应根据地质情况确定, 宜为 50mm~100mm, 不宜小于 50mm, 强度不应低于 C25。

5.3 施工

5.3.1 超前小导管所用钢管进场后应按批抽取试件进行屈服强度、抗拉强度和伸长率力学性能试验和冷弯工艺性能试验, 其质量应符合国家有关规定及设计要求。以同牌号、同炉罐号、同规格、同交货状态的钢管, 每 60t 为一批, 不足 60t 按一批计。施工单位每批抽检一次。

5.3.2 超前小导管制作时, 应先把钢管截成设计长度, 在钢管的前端做成圆锥状。尾部一端 0.6m~1m 范围内钢管不开孔作为止浆段, 止浆段可根据情况焊接 $\phi 8\text{mm}$ 钢筋加劲箍, 剩余部分钢管每隔 $100\text{mm}\sim 200\text{mm}$ 梅花形布设 $\phi 6\text{mm}\sim \phi 8\text{mm}$ 的溢浆孔(图 5.3.2)。

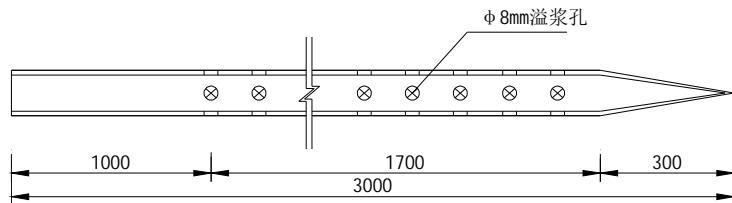


图 5.3.2 小导管加工示意图 (单位: mm, 以管长 3000mm 为例)

5.3.3 应根据施工图纸在开挖面上准确标画出本循环小导管的孔位, 孔位定位应准确, 偏差不宜大于 20mm 。

5.3.4 超前小导管施作可根据地质情况及小导管长度, 采用直接顶入、吹管后顶入、钻机引孔后放入等工艺。小导管安设应符合下列规定:

1 打入时小导管应沿设计孔位和外插角打入围岩, 小导管宜从紧靠开挖面的格栅拱架上部或腹部穿过, 顶入长度不应小于设计长度的 95%;

2 钻孔时孔径宜比小导管直径大 $3\text{mm}\sim 10\text{mm}$, 孔位偏差不宜大于 50mm , 孔深宜比导管设置深度大 $30\text{mm}\sim 50\text{mm}$, 外插角满足设计要求。钻孔不应采用带水钻机成孔。成孔后检测孔径、孔深及钻孔角度, 满足设计要求后宜采用吹孔法清除孔中碎渣土;

3 小导管就位后导管孔口宜安装孔口阀门或止浆塞, 尾部应与格栅拱架焊接;

4 小导管设置完成后管尾外露长度宜为 300mm ;

5 超前小导管施工质量允许偏差应符合表 5.3.4 的规定。

表 5.3.4 超前小导管施工质量允许偏差

序号	项 目	允许偏差	检查频率	检查方法
1	小导管长度	不小于设计长度, 打入时不小于设计长度的 95%	检查 10%	尺量
2	孔位 (mm)	± 50	检查 10%	尺量
3	孔口间距 (mm)	± 50	检查 10%	尺量
4	钻孔深度 (mm)	$0\sim 50$	检查 10%	尺量
5	孔径	符合设计要求	检查 10%	尺量
6	成孔角度/小导管打设外插角	$\leq 3^\circ$	检查 10%	全站仪

5.3.5 注浆开始前, 应根据单液浆、双液浆等浆液类型正确连接管路, 双液注浆可按图 5.3.5 进行连接。安装分浆器同时多管注浆时每个小导管宜单独安装孔口压力表。单液注浆时撤掉一条管路。

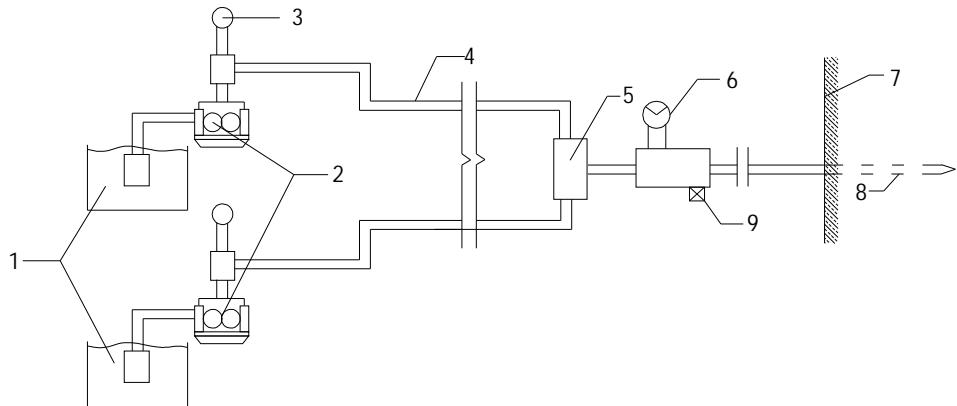


图 5.3.5 双液注浆管路连接示意图

1—储浆池；2—注浆泵；3—注浆泵压力表；4—输浆管；5—混合器；
6—孔口压力表；7—工作面；8—导管；9—泄浆阀

5.3.6 管路连接完成后应进行压浆试验, 检验管路的密封性, 压浆试验的压力不应小于设计终压, 时间不少于 5min。

5.3.7 注浆施工应根据土质条件选择注浆法。砂卵石地层中宜采用渗入注浆法; 砂层中宜采用挤压、渗透注浆法; 在黏土层中宜采用劈裂或电动硅化注浆法。

5.3.8 超前小导管注浆前应先冲洗管内沉积物, 注浆顺序应符合下列规定:

- 1 宜采用二序跳孔间隔施工;
- 2 由下至拱顶顺序进行;
- 3 应先注无水孔, 后注有水孔; 先注小水孔, 后注大水孔;
- 4 小导管采用双排孔设置时, 注浆顺序宜先注内圈后注外圈。

5.3.9 注浆时应观测注浆压力和流量的变化, 发生漏浆、串浆等异常情况时, 应采用调整胶凝时间、间歇注浆、封堵等措施处理。

5.3.10 当满足下列条件时可结束单孔注浆:

1 注浆压力达到设计终压, 且注浆量达到设计注浆量的 80% 以上, 或持续注浆 10min 注浆速度降低为开始注浆速度的 1/4 时, 可结束单孔注浆;

2 注浆压力未能达到设计终压, 但注浆量已达到设计注浆量 1.5 倍, 且无漏浆现象, 可结束单孔注浆。

5.3.11 注浆压力达到设计终压, 注浆量未达到设计量的 80%时, 应根据相邻小导管注浆量大小, 判断是否可以终止单孔注浆, 必要时应补孔注浆。

5.3.12 当 80% 小导管注浆孔达到单孔注浆结束标准, 且无漏注现象, 可结束单循环超前小导管注浆。

5.3.13 注浆结束后的小导管应立即封堵孔口。注浆施工中应填写注浆记录, 随时分析和改进作业, 并观察施工支护工作面的状态。

6 超前管棚注浆

6.1 一般规定

6.1.1 隧道在洞口及洞身浅埋段、软弱围岩或断层破碎带、变换断面及近接重大风险源施工时可采用超前管棚注浆。

6.1.2 超前管棚注浆可作为超前支护措施单独使用，也可与超前小导管注浆和超前深孔注浆等措施组合使用。

6.1.3 超前管棚注浆加固厚度不宜大于 500mm。

6.1.4 超前管棚施作宜在套拱完成后进行，套拱钢架应采用 2 根长钢管锁脚。套拱拱部应预留孔口导向钢管，导向钢管应焊接固定在套拱钢架上，导向钢管安设的平面位置、倾角、外插角应符合设计要求。

6.1.5 超前管棚施作应采用机械钻进，宜采用定向成孔技术。

6.1.6 管棚盲区等特殊部位宜采用超前小导管、局部注浆等工艺进行加固补强。

6.1.7 隧道的开挖长度应满足设计要求，并应小于管棚的注浆长度。

6.2 设计

6.2.1 超前管棚注浆设计应考虑根据地质条件、隧道断面形式、隧道埋深、与风险源位置关系等因素。

6.2.2 超前管棚宜沿隧道拱顶 150° 范围对称均匀布设，如隧道偏压、侧穿风险源等特殊情况可延伸到隧道边墙或不对称单边布设，管棚钢管环向间距宜为 300mm～400mm，相邻管棚管间的间隙不宜大于 250mm，外插角宜控制在 0°～8°。管棚套拱环上宜根据管棚直径和间距预留孔口管。

6.2.3 管棚注浆量应根据地层情况按本规程第 5.2.6 条计算确定，其中地层填充系数 α 可取 0.7～0.9，浆液损失系数 β 宜取 1.05～1.20。注浆参数应根据注浆试验结果及现场情况调整。

6.2.4 隧道近接风险源施工，超前管棚宜选用止浆塞分段后退式注浆工艺；开马头门或变换隧道断面施工时超前管棚可采用全孔一次性注浆工艺。

6.2.5 超前管棚注浆参数不宜大于表 6.2.5 的规定：

表 6.2.5 超前管棚注浆设计参数表

项目	注浆终压	扩散半径	注浆速度
上限值	1.5MPa	250mm	50L/min

6.2.6 超前管棚注浆材料可选用双液浆、单液浆或砂浆。止浆塞分段后退式注浆工艺应选用单液浆。地下水丰富地段可采用水泥-水玻璃双液浆。

6.3 施工

6.3.1 管棚宜采用外径 76mm~180mm 热轧无缝钢管或焊接钢管制作，管材壁厚不宜小于 5mm，钢管前端加工成尖锥状，中部溢浆孔直径宜为 6mm~12mm 呈梅花形交错布置，管棚管尾部 1.2m~2m 范围内不应设溢浆孔形成止浆段。管棚宜根据管棚长度、钻进设备、施工场地等条件分段加工成多节，各节段间应采用丝扣组合或内、外衬管焊接，不得将管材直接对齐拼焊。棚管管口宜设置止浆板。

6.3.2 管棚套拱施工时应先定位工字钢架，两榀钢拱架之间用连接钢筋焊接牢固。工字钢架定位准确后，在工字钢架上准确安设孔口导向钢管，孔口导向钢管应与工字钢焊接固定，孔口导向钢管定位应准确，倾角、方向应符合设计要求。孔口导向钢管定位时，宜先定出顶部位置，然后向两边对称按设计间距布置。套拱混凝土浇注时宜底部对称向上浇注，振捣密实。

6.3.3 管棚的施作应根据工程条件选取由钻机引孔后顶入、偏心潜孔锤带入、套管成孔放入等施工方法。施工时宜先由起拱线以上部位开始，后进行拱部施工，并可间隔进行。钻孔或打入过程中应测量孔口方向满足外插角要求，不应偏斜，不应侵线。钻孔施工宜先低速低压钻进，钻进 10m 后再提高压力和速度完成钻孔。孔口偏差不宜大于 50mm，孔深偏差不应大于 300mm。

6.3.4 管棚钢管宜分节连接顶入钻孔，节段长度不宜小于 2m，相邻棚管间的接头应错开不小于 1m，管棚纵向同一横截面处接头数量不得大于总接头的 50%。各节段间应采用丝扣组合或内、外衬管焊接，不得将管材直接对齐拼焊。

6.3.5 管棚安装前应先用高压气从孔底清理浮渣，将钢管低速顶进就位并对孔口进行封堵保护。

6.3.6 超前管棚注浆施作宜采用二序跳孔间隔进行。注浆顺序宜先注下部孔，后注上部孔，有水时宜从无水孔向有水孔进行。注浆时应将注浆管深入到管棚孔底。注浆过程中，后序孔可作为前期孔的检查孔。正式注浆前应进行管路压力实验。

6.3.7 土层较软时宜在单根钢管打设完成后及时进行注浆，注浆时发生漏浆、串浆等异常情况时，应采用调整胶凝时间、间歇注浆、封堵等措施处理，应确保浆液有效注入。

6.3.8 当满足下列条件时可结束单孔注浆：

1 注浆压力达到设计终压，且注浆量达到设计注浆量的 80%以上，或持续注浆 10min 注浆速度降低为开始注浆速度的 1/4 时，可结束单孔注浆；

2 注浆压力未能达到设计终压, 但注浆量已达到设计注浆量 1.5 倍, 且无漏浆现象, 可结束单孔注浆。

6.3.9 注浆压力达到设计终压, 注浆量未达到设计量的 80%时, 应根据相邻大管棚注浆量大小, 判断是否可以终止单孔注浆, 必要时应采用补孔注浆。

6.3.10 当大管棚施工满足下列条件之一时可结束单环大管棚注浆:

- 1** 90%以上大管棚孔达到单孔注浆结束标准, 且无漏注现象;
- 2** 有少量渗漏, 但注浆后涌水量小于 $3\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$;
- 3** 采用检查孔检查, 检查孔渗水量小于 $0.2\text{L}/(\text{m}\cdot\text{min})$;
- 4** 检查孔钻取岩芯, 浆液充填饱满;
- 5** 浆液有效注入范围大于设计值。

6.3.11 超前管棚施工质量检查及控制标准应符合表 6.3.11 规定。

表 6.3.11 超前管棚施工质量检查及控制标准

序号	检查项目	施工控制值	检验频率	检验方法
1	管棚钢管长度 (mm)	不小于设计值	逐根检查	尺量
2	管棚钢管数量 (根)	不少于设计值	逐环清点	目测
3	管棚钢管环向间距 (mm)	± 50	每环检查不少于 5 根	尺量
4	钻孔深度 (mm)	$0\sim 300$	检查 10%	尺量
5	孔径 (mm)	符合设计要求	检查 10%	尺量
6	成孔角度/钢管打设外插角	$\leq 2^\circ$	检查 10%	水准尺、坡度板
7	管棚内浆液	密实、饱满	每环检查不少于 5 根	目测、电测
8	管棚外注浆	符合设计要求	检查 10%	本规程第 11 章

6.3.12 单根棚管注浆结束后应采用水泥砂浆充填封堵导向钢管与棚管间的缝隙。

6.3.13 施工中应加强洞口下沉、周边收敛及周边围岩检查观察, 注浆过程中加强对套拱变形的监控量测, 并做好加固预案。

6.3.14 全段管棚注浆结束, 水泥浆达到设计强度的 70%后方可进行洞身拱部开挖。

7 帷幕注浆

7.1 一般规定

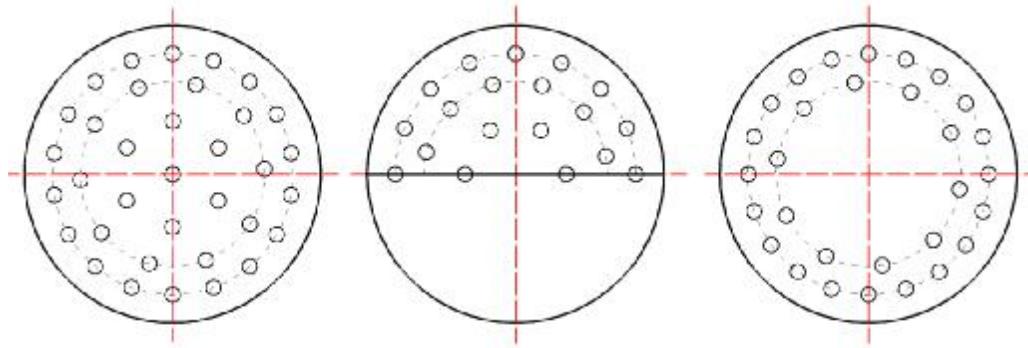
7.1.1 帷幕注浆适用于隧道施工过程中封堵地下水、加固软弱围岩、处理隧道坍塌及洞室变形控制。

7.1.2 帷幕注浆可结合地质情况并根据加固的目的采用全断面帷幕注浆、半断面帷幕注浆及周边帷幕注浆。

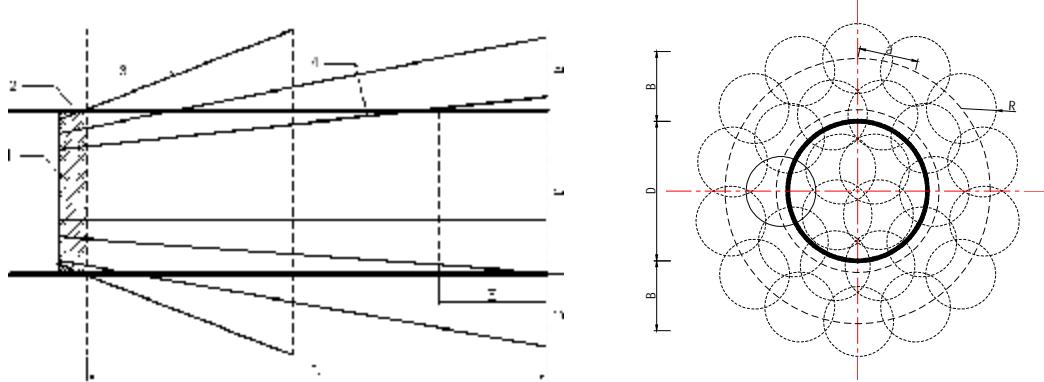
7.1.3 结合工程地质情况，帷幕注浆可采用单孔一次性注浆、分段前进式注浆，钻杆后退式注浆和分段后退式注浆等工艺。

7.2 设计

7.2.1 帷幕注浆设计应根据水文地质条件、环境状况、隧道断面大小及支护结构形式选用设计参数（图 7.2.1）。



(a) 全断面帷幕注浆布孔示意图 (b) 半断面帷幕注浆布孔示意图 (c) 周边帷幕注浆布孔示意图



(d) 全断面帷幕注浆纵断面图

(e) 全断面帷幕注浆终孔交圈图

图 7.2.1 帷幕注浆设计示意图

1—止浆墙；2—开挖轮廓线；3—补孔断面；4—注浆孔

注： L —循环注浆长度； D —隧道洞径； B —加固圈厚度； R —浆液扩散半径； a —终孔间距

7.2.2 止浆墙宜采用加筋喷射混凝土或模筑混凝土的方法施作，混凝土强度等级不应低于 C20，厚度不宜小于 500mm。

7.2.3 帷幕厚度应能承受外部静水压力，开挖轮廓线外加固圈厚度 B 宜取 1.5m~4m，水量小、水压低时取小值；水量大，水压高时取大值。

7.2.4 洞内帷幕注浆每循环段长 L 宜取 6m~12m，多循环作业，相邻注浆循环搭接长度宜为 2m~3m。

7.2.5 设计浆液扩散半径 R 可依据地层性质、地下水压、浆液材料、注浆压力等因素按表 7.2.5 内取值，并应符合下列规定：

表 7.2.5 浆液扩散半径取值范围 (mm)

地层	黏性土、粉土	细、中砂	粗、砾砂	卵石	岩层破碎带
扩散半径	200~400	250~500	300~600	600~1000	800~1500

- 1 地层空隙大，浆液扩散半径宜取高值；
- 2 地层水压低，浆液扩散半径宜取高值；
- 3 注浆压力高，浆液扩散半径宜取高值；
- 4 浆液颗粒细，浆液扩散半径宜取高值；
- 5 在不同地层界面处，浆液扩散半径宜取低值。

7.2.6 帷幕注浆孔位布置应根据注浆范围和隧道开挖形式。当采取单排（圈）孔注浆设计时，注浆孔间距 a 不应大于 1.5 倍的浆液扩散半径；当单排（圈）孔不能满足注浆加固厚度的要求时，应采用两排（圈）或多排（圈）孔进行注浆设计。注浆孔间距不应大于 2 倍的浆液扩散半径，不应出现孔与孔之间的搭接不紧密的注浆盲区。多排或多圈孔布置时，宜采用梅花形布置，最优搭接为等边三角形梅花形布置（图 7.2.6）。

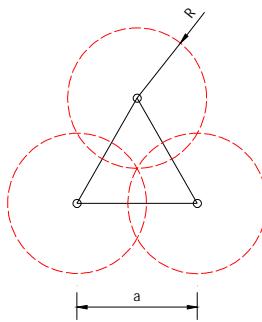


图 7.2.6 注浆孔最优搭接图

7.2.7 注浆盲区可通过设置补孔断面，调整注浆孔角度、短孔与长孔相结合等方式消除。

7.2.8 注浆压力应根据理论计算、经验类比和现场、室内试验综合确定,宜取 $0.5\text{MPa} \sim 1.5\text{MPa}$,且应大于隧道注浆位置地层水压力的 2 倍~3 倍,但不应对邻近既有建筑物、构筑物及地表产生不良影响。

7.2.9 设计注浆量应按本规程公式 5.2.6 及表 5.2.6 进行估算,地层填充系数 α 宜取 $0.6 \sim 1.0$ 。

7.3 施工

7.3.1 应按照设计要求进行止浆墙施工,应在掌子面形成稳定的封闭状态。

7.3.2 注浆顺序应按分序加密、跳孔施工的原则,结合工程地质情况帷幕注浆可采取由外侧到内侧、由下层到上层的注浆顺序进行注浆,注浆施工中存在着较大的水流时,应考虑水流对注浆效果的影响,采用由上游到下游的注浆顺序。

7.3.3 当注浆区域工程地质情况变化较大时宜采取分区注浆工序,对每个区域进行注浆试验,确定每区的注浆材料和注浆参数。

7.3.4 注浆施工采取跳孔分序注浆时,先序注浆孔宜采取定量注浆,后序注浆孔宜采取定压注浆的控制措施。

7.3.5 易发生涌水、涌砂的地层应安设孔口管,必要时加设防突涌装置。

7.3.6 钻孔设备宜采用技术先进,钻孔速度快,智能化强的多功能履带式钻机,注浆设备宜采用集自动拌浆,自动计量,数据采集的智能化注浆泵站。

7.3.7 帷幕注浆应在掌子面标示出孔位,开孔孔位偏差不宜大于 200mm ,成孔偏斜率不宜大于 1%。

7.3.8 注浆孔钻设根据地层情况可以采用风动潜孔锤成孔或水钻成孔,钻孔孔径不小于 60mm 。

7.3.9 钻孔过程中应做好钻探详细记录,包括钻进进尺、起止深度、土层性质、地下水情况等。

7.3.10 注浆前应检查注浆管路及连接件、孔口管、止浆塞等,并进行试压。注浆开始前应检查高压管路连接是否牢固,过程中应控制好注浆压力,防止因注浆压力过大而产生事故。

7.3.11 注浆前应检查止浆墙密封情况,发现止浆墙漏浆、跑浆应及时采取措施封堵。

7.3.12 浆液胶凝时间应适当,浆液配比控制应准确,注浆宜连续,注浆量应足够。

7.3.13 注浆施工应满足下列规定:

- 1 应设立防护措施, 保持场地清洁, 注浆效果检查孔应封填密实;
- 2 应经常观察泵压和流量的变化, 防止出现工作面漏浆、跑浆及串浆等情况;
- 3 注浆前应分析地下水流动轨迹, 并测试水压;
- 4 地层内有流动地下水时, 注浆顺序应从上游到下游注浆;
- 5 注浆应从外圈向内圈、跳孔施作的顺序作业;
- 6 双液浆注浆结束时应先停水玻璃泵, 后停水泥浆泵, 及时清洗管路;
- 7 隧道开挖前, 应进行注浆效果检查评定;
- 8 隧道开挖后, 应对注浆效果进行观测与分析, 对于薄弱带应进行动态补偿注浆。

7.3.14 注浆过程中出现管路堵塞、跑浆、串浆等问题时, 应分析原因并及时处理。

7.3.15 注浆过程应对作业面附近的隧道结构及邻近作业区域的建构筑物进行信息化监测, 及时反馈监测信息, 动态调整注浆参数。

7.3.16 当帷幕注浆孔达到设计孔深, 满足下列条件之一时可结束单孔注浆:

- 1 注浆过程中压力逐渐上升, 流量逐渐减少, 并达到设计注浆量, 当压力达到注浆终压, 可结束单孔注浆;
- 2 注浆压力未能达到设计终压, 注浆量已达到设计注浆量 2.0 倍, 可结束单孔注浆。

7.3.17 90%注浆孔达到单孔注浆结束标准, 无漏注现象, 依据本规程第 11.2 节的规定检查, 注浆效果满足设计和本规程的要求后, 可结束单循环注浆。

7.3.18 注浆孔未能达到设计孔深, 应分析原因, 可采用加强相邻周边孔注浆或补孔注浆的方法解决。

7.3.19 施工过程对注浆盲区或钻孔注浆揭示地层差的区域, 应在适当区域增加注浆以消除盲区或加强软弱区域的注浆效果。

8 局部注浆和径向注浆

8.1 一般规定

8.1.1 施工过程中对不良地层局部涌水和薄弱部位进行的注浆或注浆后开挖过程对帷幕注浆盲区进行的补充注浆可采用局部注浆；隧道修建中需要控制地层位移、初期支护变形、止水等情况时可采用径向注浆。

8.1.2 局部注浆宜采用小导管注浆或深孔注浆的方式进行。

8.1.3 注浆材料宜采用速凝、早强型注浆材料，快速获得止水或加固效果。地层孔隙较小，封堵微小孔隙渗漏水的径向注浆止水工程宜使用超细水泥单液浆，初期支护有大面积渗水时，宜采用硫铝酸盐水泥单液浆。

8.2 设计

8.2.1 局部注浆区域宜采取加筋喷射混凝土封闭，形成止浆墙。

8.2.2 注浆孔布置范围应根据地质、水文条件，结合现场的作业环境等综合因素确定，当局部注浆周边地层破碎，地下水发育时，注浆范围应大于局部注浆区域不小于 1m~1.5m。

8.2.3 注浆加固深度宜根据加固区域工程地质和注浆目的确定。

8.2.4 注浆孔布置宜采取三角形或矩形布置，注浆孔终孔间距宜取 1m~2m，当浆液流动性大时取大值，浆液流动性小时取小值。

8.2.5 注浆材料应采用胶凝时间可控、扩散性好的浆液。

8.2.6 注浆压力应综合根据注浆区域覆土厚度、浆液扩散性能及岩体条件等因素通过试验确定。

8.2.7 单孔注浆量或局部注浆量可按本规程第 5.2.6 条的规定计算确定，地层填充系数 α 宜取 0.6~1.0。

8.2.8 径向注浆孔采用展开的梅花形布设，孔间距宜为 0.5m~3m，孔深宜为 1.5m~5m。

8.2.9 径向注浆设计参数宜按表 8.2.9 选取。

表 8.2.9 径向注浆设计参数表

参数	注浆终压	扩散半径	注浆速度
取值	$\leq 1.0 \text{ MPa}$	0.6m~4m	$\leq 50 \text{ L/min}$

8.3 施工

8.3.1 注浆深度不大于 5m 时宜采用单孔一次性注浆；深度大于 5m 时宜采取分段后退式注浆工艺实施。

8.3.2 注浆施工前应检查注浆区域的封闭措施，强度和范围应能保证不漏浆、不串浆。

8.3.3 注浆实施前应按施工要求准备拌浆、储浆、注浆设备，检查机具设备和风水电等管线管路，并应进行试运转。

8.3.4 注浆作业应按照分序加密的顺序进行施工，应按照先周边孔，后内部孔。

8.3.5 注浆作业时应观察注浆压力及流量变化，控制注浆参数。

8.3.6 施工过程应根据作业区域环境及注浆效果，及时调整布孔参数。

8.3.7 局部注浆注浆压力达到设计终压，浆液注入量已达到计算值的 80% 以上时可结束单孔注浆。所有注浆孔均符合单孔结束条件，无渗漏时，可结束注浆。

8.3.8 注浆过程中施工后序注浆孔时应对前序注浆孔进行注浆效果检查，注浆结束后应根据本规程要求对注浆效果进行检查评定。

8.3.9 径向注浆应从两边墙底部向拱顶进行，宜按从无水孔向有水孔、从少水孔向大水孔、从散水区域向集中涌水区域的次序进行注浆。

8.3.10 径向注浆满足下列条件之一时可结束单孔注浆：

- 1 注浆压力达到设计终压，且注浆量达到设计注浆量的 80% 以上；
- 2 注浆压力未能达到设计终压，但注浆量已达到设计注浆量 1.5 倍，且无漏浆现象。

8.3.11 径向注浆注浆压力达到设计终压，注浆量未达到设计量的 80% 时，应根据相邻孔注浆量大小，判断是否可以终止单孔注浆，必要时应补孔注浆。

8.3.12 当 90% 径向注浆孔达到单孔注浆结束标准，且无漏注现象、止水率或控制围岩变形达到设计要求，可结束一段径向注浆施工。

9 矿山法隧道背后填充注浆

9.1 一般规定

9.1.1 填充注浆应采用结石率高、不分解的浆液。

9.1.2 初期支护背后填充注浆应跟随开挖工作面支护成环后及时进行。

9.1.3 初期支护与二次衬砌之间填充注浆应在二次衬砌混凝土强度达到设计强度的75%以后进行。

9.2 设计

9.2.1 初期支护背后填充注浆孔应沿隧道拱部及边墙梅花形布设。环向间距宜为1.5m~2.5m, 纵向间距宜为2.5m~3.5m, 注浆深度宜为初期支护背后0.5m(图9.2.1)。

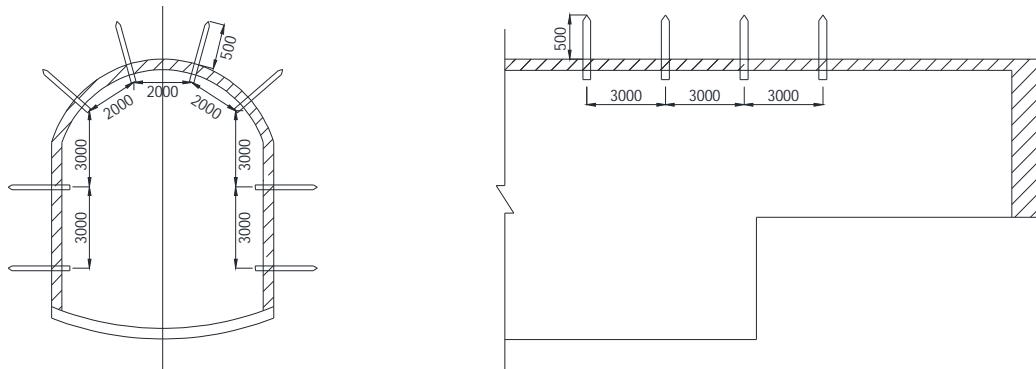


图9.2.1 初期支护背后填充注浆孔位示意图(单位: mm)

9.2.2 初期支护背后填充注浆设计参数宜按表9.2.2选取。

表9.2.2 初期支护背后填充注浆设计参数表

参数	注浆终压	影响半径	注浆速度
取值	$\leq 0.5 \text{ MPa}$	1.4m~1.8m	$\leq 30 \text{ L/min}$

9.2.3 初期支护和二次衬砌之间的填充注浆孔应在隧道拱顶布设, 纵向间距应不大于5m。

9.2.4 初期支护和二次衬砌之间填充注浆设计参数宜按表9.2.4选取。

表9.2.4 初期支护和二次衬砌之间填充注浆设计参数表

参数	注浆终压	影响半径	注浆速度
取值	$\leq 0.2 \text{ MPa}$	2m~3m	$\leq 30 \text{ L/min}$

9.2.5 背后注浆的注浆量可经断面扫描计算空隙体积后确定。

9.3 施工

9.3.1 填充注浆宜采用单孔一次性注浆工艺，按单液注浆方式连接注浆管路，开始前应进行压浆试验。

9.3.2 初期支护施作时，初期支护背后填充注浆的注浆管宜外露 100mm，封堵管口后再喷射混凝土。

9.3.3 初期支护背后填充注浆材料可选用普通水泥单液浆或水泥砂浆。硫铝酸盐水泥单液浆。

9.3.4 初期支护与二次衬砌之间填充注浆材料应采用水泥砂浆，强度、流动性、收缩性能应符合设计要求。

9.3.5 初期支护与二次衬砌之间填充注浆管可在二次衬砌时预埋或后期钻孔埋设。钻孔埋设时，钻杆应有限深装置，不得钻破防水层。

9.3.6 初期支护背后填充注浆当注浆压力逐渐上升，流量逐渐减少，注浆压力达到设计终压后，稳定不少于 3min 或相邻孔出现串浆，可结束单孔注浆。

9.3.7 未满足本规程第 9.3.6 条的注浆孔，应统计分析注浆资料，在压力、流量异常孔旁边重新开孔检查补注，保证填充注浆效果后，可结束异常孔注浆。

9.3.8 满足本规程第 9.3.6 条、第 9.3.7 条后，检查无漏孔，可结束一段隧道填充注浆施工。

10 盾构法隧道壁后注浆

10.1 一般规定

10.1.1 盾构隧道施工应进行壁后注浆, 盾构注浆系统应与地质条件相适应。注浆系统应具备注入速度和注入压力调节及监测功能。

10.1.2 同步注浆应与盾构掘进同时进行。同步注浆应确保同步、足量和及时, 并应根据地面建筑物、构筑物的隆陷状况和出土情况及时调整注浆参数。

10.1.3 同步注浆结束后应根据地表沉降监测信息反馈, 结合洞内超声波探测管片衬砌背后的空洞情况, 或根据隧道风险状态和环境保护要求, 综合确定二次注浆的位置及范围。

10.1.4 壁后注浆应根据工程地质条件、地表沉降控制要求、环境控制要求及设备情况等选择注浆方式和注浆参数。

10.1.5 壁后注浆过程中, 应采取措施减少注浆施工对周围环境的影响。

10.1.6 应按盾构施工风险源、后期地层变形情况, 根据监控量测进行洞内深孔注浆加固盾构隧道与邻近建筑物、构筑物基础之间的土体。

10.2 设计

10.2.1 壁后注浆应明确注浆时序、注浆材料、注浆量、注浆压力, 以及注浆填充效果等要求。

10.2.2 应根据注浆要求进行注浆材料的选择和试验。可按地质条件、隧道条件、工程环境和设备条件合理选用单液或双液注浆材料。盾构穿越重要建筑物、桥梁等对地面沉降要求较高及环境保护要求高的地段宜选用双液浆液。

10.2.3 壁后注浆材料应满足强度、凝结时间、可填充性、流动性、收缩率、环境保护等要求。

10.2.4 同步注浆宜选用水泥砂浆, 宜由水泥、粉煤灰、膨润土、砂、外掺剂、水等搅拌而成, 材料的要求应符合本标准第 4.2 节的规定, 水泥砂浆浆液性能应符合表 10.2.4-1 的规定; 二次注浆可选用水泥砂浆, 必要时可采用水泥-水玻璃双液浆。双液浆宜由水泥、粉煤灰、膨润土、水搅拌后与水玻璃混合而成, 材料的要求应符合本标准第 4.2 节的规定, 浆液性能应符合表 10.2.4-2 的规定。浆液混合比、凝固时间应通过试验确定, 浆液配制应符合本规程第 4.3 节的规定。采用预拌盾构注浆料时应符合现行北京市地方标准《预拌盾构注浆料应用技术规程》DB11/T 1608 的规定。

表 10.2.4-1 水泥砂浆浆液性能

项目	性能要求
稠度 (mm)	100~130
稠度经时损失 (mm/h)	≤10
流动度 (mm)	160~280
流动度经时损失 (mm/h)	≤20
泌水率 (%)	≤3.5
分层度 (mm)	≤6
凝结时间 (h)	≤6

表 10.2.4-2 双液浆浆液性能

项目	性能要求
28d 抗压强度 (MPa)	≥2
表观凝结时间 (s)	15~48
固结率 (%)	≥99

10.2.5 同步注浆的设计注浆量宜按公式 10.2.5-1、10.2.5-2 计算，并应根据地质情况、隧道稳定性、施工情况和环境要求进行调整。

$$Q = V \cdot \lambda \quad (10.2.5-1)$$

$$V = \pi(D^2 - d^2) \cdot L / 4 \quad (10.2.5-2)$$

式中： Q ——设计注浆量 (m^3)；

V ——理论填充体积 (m^3)；

λ ——填充系数；

D ——盾构切削外径 (m)；

d ——预制管片外径 (m)；

L ——每次注浆填充长度 (m)。

10.2.6 同步注浆的注浆量填充系数应根据地层条件、浆液类型、施工水平和环境要求确定，填充系数 λ 宜为 1.3~2.5。

10.2.7 注浆压力应根据地质条件、注浆方式、管片强度、设备性能、浆液特性和隧道埋深等综合因素确定。

10.2.8 同步注浆的注浆流量应根据设计注浆量和盾构掘进速度确定。

10.2.9 二次注浆宜通过管片预留注浆孔进行,注浆压力应根据隧道覆土厚度、地下水的压力及管片的强度确定,钢管片注浆孔处的压力不得大于0.4MPa。

10.3 施工

10.3.1 注浆实施前应按施工要求准备、检查拌浆、储浆、注浆设备,并应进行试运转。

10.3.2 宜配备对注浆量、注浆压力、注浆时间等参数进行自动记录的仪器。

10.3.3 同步注浆作业宜在盾构掘进前5min开始,掘进完成后继续注浆5min。

10.3.4 同步注浆作业应连续进行,应观察注浆压力及流量变化,采取压力优先原则控制注浆参数。对管片背后的注浆操作宜多点对称均匀,并应根据盾构姿态调整注浆压力、注浆量等参数。

10.3.5 注浆过程应检查注浆设备,设备应运转正常,输浆管路应畅通。注浆结束后应在一定压力下关闭浆液分配系统,同时打开回路管,停止注浆。注浆管路内压力降至零后拆下管路进行清洗。

10.3.6 当盾构机停止工作时间较长时应及时清洗注浆设备,浆液不应堵塞管道。

10.3.7 同步注浆应与盾构推进相适应,当同步注浆作业发生故障时,应立即停止盾构掘进,及时排除故障。

10.3.8 同步注浆全过程应保持注浆量、注浆压力、时间等重要参数均达到设计要求,无参数异常现象。

10.3.9 当根据设定的注浆压力和注浆量要求施工,同步注浆接近结束时,注浆量达到要求,注浆压力增大,应减小注浆压力;当注浆量还达不到设计要求,应加大注浆压力,直到满足规定的注浆量、注浆压力。

10.3.10 二次注浆宜在同步注浆完成1d后或距盾尾约5环后的位置开始注浆。

10.3.11 二次注浆前应在注浆孔位置安装注浆单向逆止阀后钻孔至预定深度后再注浆。

10.3.12 二次注浆应先对管片两侧孔注浆,后注上部孔,盾构直线段宜在管片两侧交替进行注浆,曲线段宜先在曲线外侧管片进行注浆。

10.3.13 应根据环境条件和沉降监测结果等确定控制二次注浆的注浆压力。

10.3.14 注浆过程中应设有排气孔,排气孔可设在预注浆孔上,并安装注浆单向逆止阀,同时打开球阀,直至出现冒浆时关闭球阀,停止注浆。

10.3.15 二次注浆结束时应待浆液终凝后，打开阀门确认无渗漏水现象，方可拆下管片注浆口处的球阀，并对注浆孔进行密封，清洗注浆设备及管路。

10.3.16 二次注浆采用双液注浆时，注浆孔与盾尾间的距离不宜小于 5 环。应采用双液注浆泵泵送，在混合器中混合，然后注入管片背后。注浆完成后应及时清理注浆设备。双液注浆时，应先注入纯水泥浆液 1min 后，再打开水玻璃阀进行混合注入，终孔时应加大水玻璃的浓度。拆除注浆头并用双快水泥浆对注浆孔进行封堵。

10.3.17 当出现管片破损、上浮等现象时应先采取封堵措施后再注浆。

10.3.18 二次注浆的注浆量、注浆压力、时间等重要参数均达到设计和施工方案要求，无参数异常现象时，可结束单孔注浆。

10.3.19 未满足本规程第 10.3.18 条的注浆孔，应统计分析注浆资料，在注浆量、注浆压力或盾构机掘进速度异常的区域进行重点分析检查，必要时采取再次补强注浆，保证壁后注浆效果后，可结束异常区域的壁后注浆。

10.3.20 满足本规程第 10.3.18 条～第 10.3.19 条后，检查无漏孔，管片与地层间隙填充密实，沉降监测结果满足设计要求，管片衬砌环稳定、无漏水现象，完成隧道壁后注浆。

10.3.21 盾构穿越风险源时壁后注浆应采取下列措施：

1 穿越风险源前应对盾构同步注浆系统及其配套设备和管路进行检查，对有问题的设备及时维修和更换，应能保证盾构在区间穿越时系统不发生故障停机检修；

2 同步注浆应增加注浆量和注浆压力；

3 二次注浆宜提前 1 环～2 环开始注浆，风险段采用增设注浆孔的特殊衬砌环，采取增加注浆量和注浆压力，或采用双液注浆等措施；

4 下穿风险段超出盾尾 5 环～10 环时，宜从洞内采用径向深孔注浆加固；

5 应加强、加密对风险源自身及周边地层的变形监测。

10.3.22 每一环管片壁后注浆结束后应填写注浆施工记录，每 10 环管片注浆结束后应进行注浆检查并按现行地方标准《城市轨道交通工程资料管理规程》DB11/T 1448 的要求填写注浆检查记录。

11 注浆效果检查

11.1 一般规定

11.1.1 注浆完成后, 应对注浆效果进行检查, 确认已达到注浆目的, 否则应采取补孔注浆等措施, 保证注浆效果。

11.1.2 注浆效果检查应具备下列技术资料:

- 1** 注浆施工单位资质证书及施工人员上岗证的复印件等;
- 2** 设计文件及会审记录、专家会议纪要、设计变更洽商;
- 3** 注浆施工方案;
- 4** 注浆施工安全、技术交底;
- 5** 出厂合格证、材料质量检验报告、现场抽样复验报告等注浆材料质量证明文件;
- 6** 施工检查记录。

11.2 效果检查

11.2.1 整段区间隧道二次衬砌完成后, 初期支护与二次衬砌之间的隧道拱顶填充注浆检查宜采用雷达物探法与人工敲击辨识相结合, 确保无空隙、填充注浆密实。

11.2.2 注浆效果检查方法与标准可按表 11.2.2 执行。

表 11.2.2 注浆效果检查方法与标准

检查方法		评定标准
宏观类	P - q - t 曲线法	应根据所记录的注浆压力 (P)、注浆速度 (q)、注浆时间 (t) 三者之间的关系, 绘制的 P - q - t 曲线图进行分析。满足合格标准的注浆孔数量宜大于 80%
	涌水量对比法	加固目的注浆工程止水率宜大于 80%, 或止水目的注浆工程宜大于 90%
	填充率反算法	加固目的注浆工程浆液填充率宜大于 80%, 或止水目的注浆工程宜大于 90%
检查孔类	取芯孔法	取芯孔数量宜按注浆孔数的 3%~6% 抽查。止水目的的注浆工程芯样无侧限抗压强度宜大于 0.3MPa 以上, 或加固目的的注浆工程宜大于 0.5MPa, 且应满足专项设计的要求
	检查孔法	检查孔数量按注浆孔数的 3%~6% 抽查。检查孔应成孔完整, 无涌砂、涌泥现象, 出水量小于注浆专项设计要求, 且能保持 1h 以上
	渗透系数测试法	测试孔数量按注浆孔数的 1%~3% 布设。注浆后地层的渗透系数应降低一个数量级, 且止水目的注浆宜小于 10^{-2} m/d
过程类	直接观察法	开挖面掌子面应浆液填充饱满, 能自稳, 无水或少水, 且满足安全要求, 或径向注浆、填充注浆后隧道周围渗漏水明显减少、变形得到明显控制

续表 11.2.2

	监测数据判定法	通过监测反馈的结果, 判断注浆加固效果是否达到工程要求
物探类	雷达物探法	对比注浆作业前后成果图像差异, 宏观判断注浆效果

11.2.3 加固目的深孔注浆效果检查, 宜以取芯孔法为主, 并可辅以其他 1 种~2 种方法。

11.2.4 止水目的深孔注浆效果检查, 宜以渗透系数测试法为主, 辅以其他 1 种~2 种方法。对于不适合注入清水的地层, 可用稀水泥浆代替清水, 但浆液水灰比应不小于 1.2:1。

11.2.5 开挖前可根据预设检查孔的涌水情况, 判定注浆效果, 开挖后可观察到裂隙及空隙充填效果、掌子面干燥情况判断注浆效果。

11.2.6 检查孔施作结束后应对其进行注浆封堵。

附录A 注浆施工记录表

表 A.0.1 钻孔记录表

表 C5- 钻孔记录表				资料编号	
工程名称					
施工/验收标准					
施工单位					
工程地点			工作面范围 (里程)		
钻机型号			钻孔时间	____年____月____日	
孔号	孔深	起止时间	下管深度	地层、地下水情况描述	备注
专业技术负责人		质检员		专业工长(施工员)	

填表说明: 1. 地层有变化, 一个孔可分段记录, 并有小计;
2. 情况描述: 地层情况, 有无地下水;
3. 备注: 钻孔, 下管时异常情况记录。

表 A.0.2 单孔注浆记录表

表 C5- _____ 单孔注浆记录表				资料编号		
工程名称						
施工/验收标准						
施工单位				注浆时间	____年____月____日	
工程地点				工作面范围 (里程)		
孔 号		孔 深 (m)		注浆泵型号		
总注浆量				材料消耗		
起止时间	浆液种类	配合比	胶凝时间 (s)	压 力 (MPa)	流 量 (L/min)	备 注
专业技术负责人		质检员			专业工长(施工员)	

填表说明: 1. 备注栏填漏浆、串浆情况;
 2. 改性水玻璃时配合比填 PH 值;
 3. 双液浆时填胶凝时间, 其他不填。

表 A.0.3 注浆记录统计表

表 C5- _____注浆记录统计表				资料编号	
工程名称					
施工/验收标准					
施工单位			注浆时间	____年____月____日____时 至____年____月____日____时	
工程地点			工作面范围 (里程)		
孔号	孔深 (m)	浆液种类	终压 (MPa)	注浆量 (m ³)	备注
合计		—	—		
专业技术负责人	质检员			专业工长(施工员)	

填表说明: 1. 一个孔注两种以上浆液, 可占 2 格以上, 并有注浆量小计;

2. 备注栏填注浆情况, 有无漏浆、串浆等;

3. 统计表后应附注浆记录。

表 A.0.4 注浆效果检查评定表

表 C5- 注浆效果检查评定表		资料编号	
工程名称			
施工/验收标准			
施工单位		日期	年 月 日
工程地点		注浆位置 (里程)	
1. 工程地质与水文地质情况:			
2. 涌 (渗) 水量和水压力情况:			
3. 注浆方式或工艺:			
4. 注浆材料及采用的水灰比和体积比:			
5. 注浆结束情况:			
6. 注浆效果检查及结论:			
		<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
签字栏	建设 (监理) 单位	施工单位	
		专业技术负责人	专业质检员

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 本规程中指明应按其他有关标准、规范执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

1	《混凝土外加剂应用技术规范》	GB 50119
2	《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》	GB 50652
3	《通用硅酸盐水泥》	GB 175
4	《抗硫酸盐硅酸盐水泥》	GB/T 748
5	《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》	GB/T 1596
6	《工业硅酸钠》	GB/T 4209
7	《混凝土外加剂》	GB 8076
8	《建设用砂》	GB/T 14684
9	《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》	GB/T 18046
10	《膨润土》	GB/T 20973
11	《混凝土和砂浆用再生细骨料》	GB/T 25176
12	《超细硅酸盐水泥》	GB/T 35161
13	《混凝土用水标准》	JGJ 63
14	《建筑工程水泥-水玻璃双液注浆技术规程》	JGJ/T 211
15	《再生骨料应用技术规程》	JGJ/T 240
16	《绿色施工管理规程》	DB11/T 513
17	《有限空间作业安全技术规范》	DB11/T 852
18	《城市轨道交通工程建设安全风险技术管理规范》	DB11/ 1316
19	《城市轨道交通工程资料管理规程》	DB11/T 1448
20	《预拌盾构注浆料应用技术规程》	DB11/T 1608
21	《建筑垃圾再生产品应用技术规程》	DB11/T 1975

北京市地方标准

城市轨道交通隧道工程注浆技术规程

**Technical specification for grouting in urban rail transit tunnel
engineering**

编 号： DB11/T 1444-2025

条文说明

2025 北京

目 次

1 总 则	41
2 术语和符号	42
2.1 术语	42
3 基本规定	43
4 注浆材料与浆液配制	45
4.1 一般规定	45
4.2 注浆材料	46
4.3 浆液配制	47
5 超前小导管注浆	48
5.1 一般规定	48
5.2 设 计	48
5.3 施 工	50
6 超前管棚注浆	51
6.1 一般规定	51
6.2 设 计	51
6.3 施 工	52
7 帷幕注浆	54
7.1 一般规定	54
7.2 设 计	56
7.3 施 工	57
8 局部注浆和径向注浆	60
8.1 一般规定	60
8.2 设 计	60
8.3 施 工	60
9 矿山法隧道背后填充注浆	62
9.1 一般规定	62
9.2 设 计	62
9.3 施 工	62
10 盾构法隧道壁后注浆	63
10.1 一般规定	63
10.2 设 计	63
10.3 施 工	65
11 注浆效果检查	67
11.2 效果检查	67

1 总 则

1.0.2 本市电力、热力隧道及其他地下工程的注浆设计施工可参考本规程。北京地下工程的所处的地层多为第四纪冲洪积层的粉质黏土层、粉细砂层、中粗砂层和砂砾（卵）石层，地层软弱，自稳能力差，为保证施工安全、控制地表沉降，需进行注浆设计施工。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.9 分段后退式注浆管常见有袖阀管、TSS 管、DDD 管等，具有分段止浆功能。

2.1.12 填充注浆包括初支背后填充注浆和径向注浆。

2.1.13~2.1.15 壁后注浆术语参考现行国家标准《盾构隧道工程设计标准》GB/T 51438、《盾构法隧道施工及验收规范》GB 50446 确定。

盾构掘进过程中会破坏地层，导致地层松动，同时盾构管片成环后，管片也不能完全填充盾构掘进时产生的空腔，管片与地层之间也会留有空隙，为填充这些空间和松散地层，保护周边环境，因此需在盾构掘进及管片拼装后，在管片与地层间进行同步注浆及时回填，必要时进行二次补强注浆进一步填充，确保对盾尾空隙填充密实。

壁后注浆主要目的除了及时填充盾尾产生的空隙，支撑管片周围岩体，有效地控制地表沉降外，还有为管片提供早期的稳定并使管片与周围岩体一体化，有利于盾构掘进方向的控制，并能确保盾构隧道的最终稳定等作用。

根据注浆时序，将壁后注浆分为同步注浆、即时注浆和二次注浆三类。

盾构掘进与管片拼装的同时进行同步注浆，可以及时填充不利空隙，支撑管片周围土体，防止地层产生过大变形而危及周围环境安全。

同步注浆后，地层变形及地表沉降得到控制，但可能有局部填充不够均匀或因浆液固结收缩产生空隙、或有渗漏水等情况，这时需要在管片壁后再次或多次进行二次注浆，进一步填充空隙，达到加强与密实的作用。

二次注浆一般在管片与地层间的空隙填充密实性差而致使地表沉降得不到有效控制或管片衬砌出现较严重渗漏情况下实施。施工时采用地表沉降监测信息反馈，结合洞内超声波探测管片衬砌背后有无空洞的方法，综合判断是否需要进行二次注浆。

二次注浆通过管片注浆孔进行的地层注浆，可以采用短注浆管对管片周边地层进行填充注浆，也可以采用长注浆管对管片周围地层进行压密注浆。通常填充注浆孔与管片吊装孔通用，为了达到压密注浆效果，可适当增加注浆孔数量。

2.1.21 结石率是水泥浆液配比的重要参数，目前大部分研究中均采用肉眼观察记录结石体与水的分界面对应的量筒刻度，得到的水泥浆液结石率。

在获得抗压强度指标值的标准下，结石率越高，注浆的实际效果越好。很多注浆原料很难达到理想的结石率。影响结石率的关键因素是水的沉积和浆料本身的体积。

3 基本规定

3.0.1 在注浆前,注浆设计人员需了解所注入地层的类别,如砂层、黏土层、淤泥层、砂卵石层等。如果是砂层,进行筛分试验,确认砂层属性;如果所处地层含水,明确含水层水位、水量、渗透系数。对于地层孔隙率、裂隙度需通过试验,或者采取工程类比法进行确定。

3.0.3 矿山法、盾构法、顶管法或箱涵顶进法施工的隧道、洞室工程均为危险性较大的分部分项工程,需编制专项施工方案。隧道注浆为上述伟大工程中的一环,相关内容须包括在专项施工方案中。

3.0.4 在注浆前,对不同区域选择2个~3个注浆孔作为试验孔,进行注浆试验,验证地层情况,根据地层可注浆性,调整注浆参数,试验完成后再进行注浆。

3.0.5 本条原标准第4.1.1条,为强制性条文,根据标准化改革要求改为推荐性条款。

地下工程注浆使用浆液材料数以吨计,用量巨大,如材料使用不当,极易对地下水造成严重污染,环境安全风险巨大。

在过去曾出现过用丙烯酰胺注浆引起环境污染造成大量居民中毒事件后,相关各国提出了明确禁止了使用有机化学注浆材料。随后,又经过了几十年的研究和发展,现在岩土注浆工程所用材料主要是水泥基系列和水玻璃基系列,这两个系列的材料经过改性和改良,可满足不同的工程需要,如:超细水泥、硫铝酸盐水泥、酸性水玻璃、碱性水玻璃等。

浆液材料成分要求有充分的稳定性,浆液注入地层后不能因时间、酸碱环境等变化,而使浆液分解出有毒物质二次污染地下水。对于氨基类的、含苯环的、酰胺类的、含重金属的有机化学材料严禁使用。也严禁使用不能提供浆材产品合格证和无生产厂家的成分不明的浆液。

3.0.6 本条为新增条款,对注浆施工进行智能化管理,将传统的注浆量和注浆质量事后控制改进为事前策划、事中把控,通过地层注浆量和流动状态真实模拟,对后续实际注浆量进行有效管控。

3.0.7 当前注浆设计中,往往采用“一次设计法”。对工程地质条件的考虑,仅仅表现在对复杂地层的简单、定性的概化上,给出唯一的注浆参数。这种“一次设计法”,随着工程地质条件的变化,某些地段可能出现“欠注浆”而存在安全隐患,有些地段也可能“过注浆”导致浆液材料浪费和施工进度延缓等情况。动态化注浆技术避免了“一次注浆设计”带来的弊病,将注浆与隧道开挖观测相结合,通过观测结果分析判

断掌子面前方地层、地下水变化状况，对注浆施工方案进行动态调整，指导下一循环注浆合理实施，从而实现了注浆的动态化，避免了注浆的盲目性，使注浆技术更加符合实际情况。注浆作业需要有专业工程师负责现场注浆施工管理工作，并由培训合格的工人进行操作。

3.0.8 注浆设备是注浆工程的关键工具，对注浆质量的影响很大，本条对注浆设备提出了基本要求，本次修订增加了采用智能化注浆系统。

1 钻机为注浆的主要设备之一，工程地质与水文地质条件对钻机的工作有很大的影响，因此选择的钻机须具有良好的钻进稳定性，或者易于固定牢固，使钻孔不会出现较大的偏差而影响精度，钻具与钻机需匹配地层，保证成孔质量和深度；

2 浆液泵送设备选型要求具有调节流量、压力的功能，泵送浆液需能保持均匀稳定，“牛角泵”、“羊角泵”等简易的注浆设备无法满足此要求，不能在工程中使用；

4 混合器是注双液浆施工时的专用设备，混合器的混合腔设计要合理，保证两种液体的均匀混合，并须有单向逆止功能，防止浆液回流，造成堵管；

6 注浆孔口设置压力表可以真实地反映浆液注入时的压力，有效地控制注浆质量，因此本规程中的注浆压力均须以孔口压力表为判别依据；

7 仪表需要提供合格证；

8 因为注浆工程是地下隐蔽工程，仪器的应用主要是为了提高注浆工程工作效率，减少人为记录不精确，人为作假记录的因素，从而有利于保障注浆工程质量。

3.0.10 注浆记录是分析注浆效果的主要依据，须及时、如实填写，不得事后回忆补记。

3.0.13 作业人员到达工作地点后，首先需要检查工作面是否处于安全状态，并检查支护是否牢固、稳定，如有松动的石、土块或裂缝须先给予清除或支护。

3.0.15 依据地方标准《有限空间作业安全技术规范》DB11/T 852 的规定，封闭或部分封闭、进出口受限但人员可以进入、未被设计为固定工作场所，自然通风不良，易造成有毒有害、易燃易爆物质积聚或氧含量不足的空间。隧道内施工属于有限空间作业，需根据要求对作业程序、作业人员、作业环境进行安全管理。

4 注浆材料与浆液配制

4.1 一般规定

4.1.1 普通硅酸盐水泥浆可以在大部分的注浆工程中使用；水玻璃浆既可改性后单独使用，也可与其他浆液混用；超细水泥浆适宜在粉细砂等极细颗粒地层注浆中使用。浆液使用前须在实验室进行浆材性能试验或检测。

超细水泥由无机超细微粒组成，具有与有机化学注浆液相似的良好渗透性和可注性，具有更高的强度和耐久性，不存在老化现象。超细水泥的化学组成决定了其对水、土壤、空气等周围环境无污染，相对于其他注浆材料而言，具有更高的安全性，具有环保性，对周围环境无污染。

4.1.2 注浆浆液配比参数、方法须通过实验室试验和现场试验具体综合确定。压力、浆液配比等部分注浆参数可以是一个范围，具体准确的参数可在注浆作业起始实验阶段中调整确定。

4.1.5 改性水玻璃单液浆和水泥-水玻璃双液浆凝固后强度低，水玻璃易分解，虽然被加固的地层短期内被固结，但随着分解后的浆液被地下水冲散，地层会持续发生沉降变形。但经众多工程实践证明，盾构法隧道壁后注浆采用的水泥-水玻璃双液浆是适宜的，主要原因是盾构法壁后注浆采用的双液浆中的水玻璃配比较低，通常含量小于 20%，浆液凝固后强度相对较高，也不易崩解，但初凝时间也较长，多在 30min 以上。而本规范中所提及的水泥-水玻璃双液浆，一般指水玻璃配比 50% 左右，初凝时间在 2min 以内的浆液，主要用于快速止水。

4.1.6 过去地下水丰富地层的止水注浆施工中主要采用水泥-水玻璃双液浆，其主要优点是凝结时间快和抗地下水冲散。但双液浆的固结体强度较低（1MPa 以下），且不耐久，浆液凝固时间随地层酸碱性的变化仅能维持数周，限制了注浆设计的目的。

鉴于以上原因，注浆技术人员多年来一直努力研究既速凝又耐久的浆液，通过大量的工程实践和改良，在国内重要工程的注浆施工中，逐渐研究使用以硫铝酸盐水泥为基材的 TGRM 等特种注浆材料，其注浆材料特点是凝结时间可调（5min~50min）、抗分散、永久加固、颗粒小、不收缩、无毒无污染等。近年来，又研究出 HPC-zj 外加剂，在普通硅酸盐水泥单液浆中按照一定比例掺入，可以达到硫铝酸盐水泥基材料的性能要求，进一步降低施工成本，适宜在地下水水流较大、永久加固、固结早期强度要求高、近接风险源施工等特殊深孔注浆工程中使用。

4.2 注浆材料

4.2.3 新修订的现行国家标准《建设用砂》GB/T 14684 为 2022 年发布, 标准中规定了建设用砂的性能, 建设用砂包括天然砂、机制砂和混合砂。

4.2.4 粉煤灰作为砂浆或混凝土的掺和料, 可以代替部分水泥或细骨料, 不仅能降低成本, 而且能提高拌和物的和易性、提高不透水和耐化学侵蚀性能、减轻颗粒分离和析水现象、减少收缩和开裂等作用。

4.2.5 现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 规定的外加剂品种包括高性能减水剂、高效减水剂、普通减水剂、引气减水剂、泵送剂、早强剂、缓凝剂和引气剂等; 现行国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 规定了不同剂种外加剂的应用技术要求。

4.2.7 水玻璃是工业硅酸钠水溶液的俗称, 也称泡花碱, 是一种可溶性的无机硅酸盐, 化学式为 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 。

4.2.8 注浆液中加入膨润土可以改善水泥浆的黏度、析水率、分散性、保水性等工作性能, 从而有利于提高注浆效果。但同时随着膨润土掺量的增加, 也会在一定程度上降低浆液的强度, 因此在配制浆液时要综合考虑膨润土对浆液的影响, 根据实际工程选取合理的配比。

膨润土是以蒙脱石为主的含水黏土矿, 其主要成分为二氧化硅 (SiO_2)、三氧化二铝 (Al_2O_3) 和水等化学组分组成。其中所含的 Na_2O 和 CaO 含量对膨润土的物理化学性能和工艺技术性能影响颇大。按蒙脱石所含可交换阳离子种类、含量和结晶化学性质等, 可将膨润土划分为钠基膨润土和钙基膨润土。

钠基膨润土较之钙基或镁基膨润土的物理化学性质和工艺技术性能优越, 主要表现在吸水速度慢, 但吸水率和膨胀倍数大, 在水介质中分散性好, 胶体悬浮液触变性、黏度、润滑性好, 热稳定性好。

自然界存在的膨润土绝大部分为钙基膨润土, 钠基膨润土比较稀少通过离子交换技术等特定的化学或物理方法, 将钙基膨润土钠化改性成为钠基膨润土, 以提升其使用性能, 即人工改性钠基膨润土。

但钠化后的膨润土相比天然的钠基膨润土的稳定性要差, 处在酸性环境中超过半年时间就会与酸反应成偏硅酸钠, 又恢复成钙基膨润土。因此本条强调采用天然钠基膨润土。

4.3 浆液配制

4.3.2 水泥砂浆具有料源广, 价格低, 强度高的特点, 适宜在二次衬砌和初期支护之间空隙填充注浆中使用。

4.3.2 水泥砂浆具有料源广, 价格低, 强度高的特点, 适宜在二次衬砌和初期支护之间空隙填充注浆中使用。

4.3.3 根据北京市相关文件规定, 在本市行政区域内办理施工许可的房屋建筑和市政基础设施工程禁止现场搅拌砂浆, 其中砌筑(包括砌块专用砂浆和砌块黏结剂等配套砂浆)、抹灰、地面类普通砂浆, 应使用散装预拌砂浆。特种预拌砂浆倡导使用散装方式。如果维修工程或修缮项目中少量使用砂浆, 可根据工程需要选择相应性能的预拌砂浆; 使用预拌砂浆现场加水拌合不在禁止范围内。轨道交通注浆工程由于常在隧道内进行, 受场地条件、工法(需要快速凝结)等原因限制, 需进行现场拌制, 但须有防止污染措施。

4.3.4 酸性水玻璃具有料源广, 价格低, 可注性好, 胶凝时间可调, 强度适宜等特点, 适宜在无水的中、细砂层中应用。

4.3.5 水泥-水玻璃双液浆具有料源广, 价格适宜, 胶凝时间易调等特点。适宜在有水条件下粗砂、砂砾等地层中临时止水使用。

4.3.7 超细单液水泥浆具有强度高, 可注性好等特点, 可代替部分化学浆材, 适宜用于细砂及细小裂缝止水及加固工程中。

因为超细水泥颗粒为次纳米级材料, 使用普通的低速搅拌机无法将颗粒分散均匀, 因此须使用专用的高速搅拌机。

5 超前小导管注浆

5.1 一般规定

5.1.1 超前小导管是隧道工程掘进施工过程中的一种工艺方法,主要用于自稳时间短的软弱破碎带、浅埋段、洞口偏压段、砂层段、砂卵石段、断层破碎带等地段的预支。

5.1.1 超前小导管是隧道工程掘进施工过程中的一种工艺方法,主要用于自稳时间短的软弱破碎带、浅埋段、洞口偏压段、砂层段、砂卵石段、断层破碎带等地段的预支护,超前小导管注浆的作用是:

1 改良工作面前上方的地层,在开挖工作面以外形成厚度为200mm~600mm的加固圈;

2 超前小导管注浆与地层共同作用形成超前支护结构,从而保证开挖工作面前上方的稳定,防止工作面坍塌,控制地表沉降。

5.1.2 超前小导管注浆与地层共同作用形成的超前预支护,但不是指仅仅由小导管、加固后的土体形成完整的支护结构,而是超前小导管配合钢拱架使用,连成整体,共同构成支护结构。因此本条强调将格栅钢筋和超前小导管互相焊接形成整体。

5.2 设 计

5.2.2~5.2.3 拱架间距、小导管长度、打入角度三者需相互协调,确保前次小导管注浆未开挖部分长度为1m以上(图1、图2)。

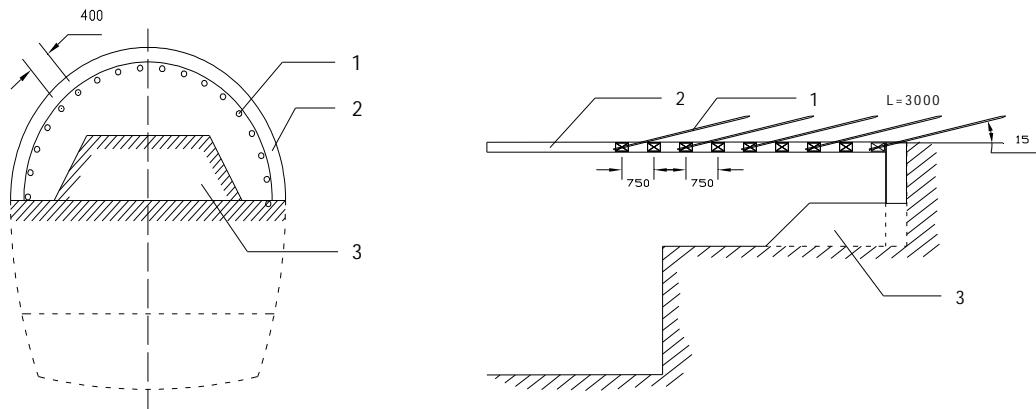


图1 小导管布设示意图(单位: mm)

1—小导管; 2—拱架; 3—核心土

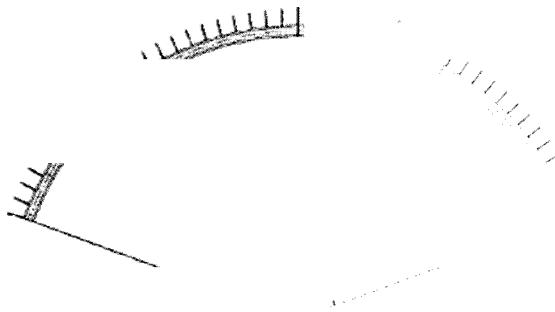
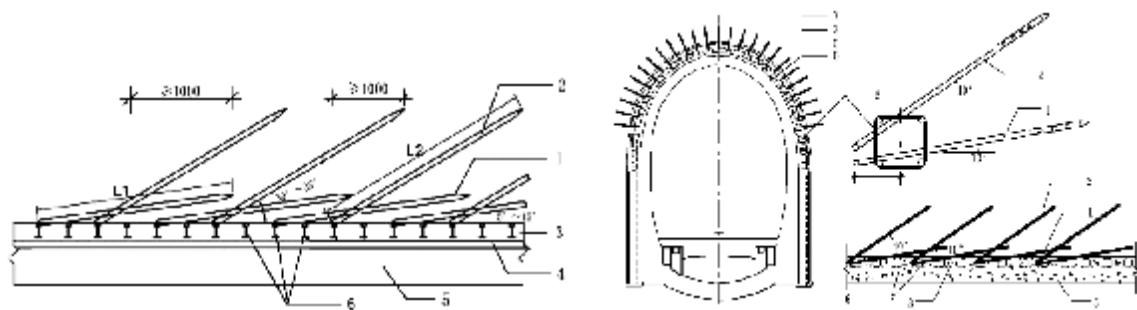


图 2 超前小导管正面设计图

小导管沿拱的环向外插角一般为 $5^\circ \sim 15^\circ$ ，小导管是受力杆件，因此两排小导管在纵向须有一定搭接长度，沿隧道纵向的搭接长度一般不小于 1m。

小导管注浆在砂卵石地层、下穿管线、断面变化等复杂情况时需逐榀施作，布置在拱顶 180° 范围。

双层小导管主要应用在隧道进出洞段，接近出洞时采用双层小导管超前支护对掌子面前方进行预加固措施，降低了施工难度，省去了洞口施工时必要的施工机具布置等，是一种行之有效的掘进方式。内侧小导管形成第一层注浆固结圈，主要稳定固结即将开挖隧道外轮廓线附近的地层；外侧一层斜外插角的注浆小导管与第一层注浆圈形成搭接的同时，形成第二层注浆加固圈，进一步加大围岩固结区的范围，确保开挖过程中的安全，控制开挖后的洞口下沉（图 3）。



(a) 双层超前小导管纵向布置大样图

(b) 超前小导管布设示意

图 3 双层小导管布设示意图

1—第 1 层超前小导管；2—第 2 层超前小导管；3—初期支护；

4—预留变形量；5—二次衬砌；6—钢拱架；7—超前小导管

5.2.4 如砂卵石地层颗粒过大，采用直径 $\phi 32\text{mm}$ 钢管制作的小导管施工困难时，为增加小导管柔性，可采用直径 $\phi 25\text{mm}$ 钢管制作短导管。

5.2.6 使用公式 5.2.6 计算注浆量时，如以劈裂机理为主要扩散形式的注浆工程，其地层填充系数 α 取公式所示较低值；如以填充或渗透为主要扩散形式的注浆工程，其

地层填充系数 α 取公式所示较高值。表 5.2.6 中地层孔隙率取值参考北京市地方标准《城市建设工程地下水控制技术规范》DB11/ 1115-2014 取值。

5.2.7 注浆速度的控制与地层条件和隧道埋深有关系。粉质黏土层或细砂层注浆时，浆液扩散不及时，易造成地面开裂，因此规定注浆速度不宜超过 20L/min。关于注浆量，一般 3m 长小导管注浆，砂砾层注浆量可取 200L/根，砂层 150L/根。

5.2.8 因小导管注浆作业时间较长，地层长期暴露容易导致土体水分渗出，增大掌子面含水率，造成土体松散，易引发滑塌事故，故作业开始前可根据地层情况先喷射混凝土封闭掌子面，形成止浆墙。喷射混凝土也可仅封闭小导管尾部与地层接触的环形部分，通常是隧道的初期支护喷射混凝土的一部分，并非将整个开挖掌子面喷射混凝土封闭。

5.3 施工

5.3.4 一般砂质地层常采用吹管法施作小导管，卵砾石地层可采用风钻引孔或短导管直接顶入，黏土和粉质黏土地层常采用煤电钻引孔后顶入。

小导管外露 300mm，便连接孔口阀门和管路。

将格栅钢筋和超前小导管互相焊接形成整体，可使其形成联合支护体系，有效抑制地层变形。

5.3.9 注浆过程中，如压力逐渐上升，流量逐渐减少属于正常合理状态；如压力长时间不上升（20min 以上），流量也不减少，可能是跑浆或者漏浆；如压力急剧上升，流量急剧减少，在排除地层因素外，可能是管路阻塞，须及时进行处理。

5.3.11 由于地下地质条件复杂，有时不可能每个注浆孔都能达到本规程第 5.3.10 条的终孔条件，须根据相邻小导管注浆量大小，合理判断是否可以终止单孔注浆，当相邻各孔注浆量较大时，可以终止单孔注浆，当相邻各孔注浆量也较小时，进行补孔注浆。

5.3.12 当本循环 80% 以上的注浆孔都达到本规程第 5.3.10 条的终孔条件，其余按本规程第 5.3.11 条的要求进行处理后，可视为本循环超前小导管注浆完成。

6 超前管棚注浆

6.1 一般规定

6.1.1 超前管棚注浆与地层共同作用形成的棚护结构成为隧道开挖超前支护结构, 从而保证开挖工作面前上方的稳定, 防止工作面坍塌, 控制地表沉降均匀, 同时改良工作面前上方的地层, 在开挖工作面以外形成厚度约为 500mm 加固拱圈。

6.1.2 超前管棚注浆仅是在一定范围内加固隧道前上方的地层, 不适宜加固隧道掌子面正前方的土体, 也不能形成全断面帷幕止水的效果。当注浆加固细颗粒松散地层或有水地层时, 超前管棚注浆须与超前小导管注浆或超前深孔注浆组合使用。

6.1.3 采用孔口一次性工艺的超前管棚注浆的加固效果具有一定的不均匀性, 其超前预支护的机理是钢管的棚架作用和注浆固结作用相结合, 因管棚通常采用单层布设的原因, 不适用于止水。

6.1.4 孔口导向钢管的导向直接影响管棚的质量, 须严格按照管棚的设计间距和水平标高、仰角准确安装、焊牢。

6.2 设 计

6.2.2 管棚注浆有一定的不均匀性, 因此要求相邻管棚间的间隙不大于 250mm。隧道区间内采用多循环大管棚注浆方案时, 可适当放大管棚仰角 ($6^\circ \sim 8^\circ$), 不设管棚工作间, 采用类同小导管注浆的搭接方法, 搭接长度的水平投影不小于 3m (图 4)。

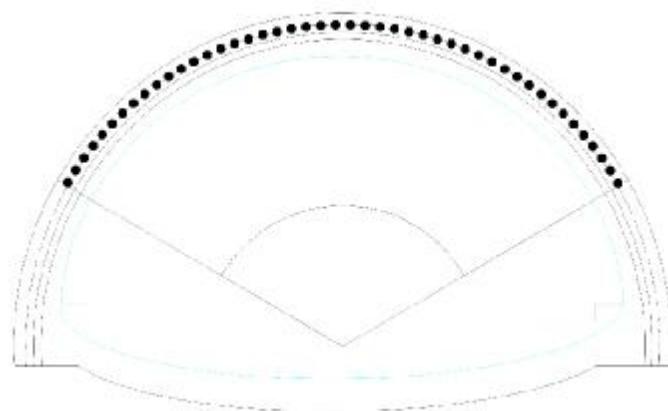


图 4 管棚加固布设示意图

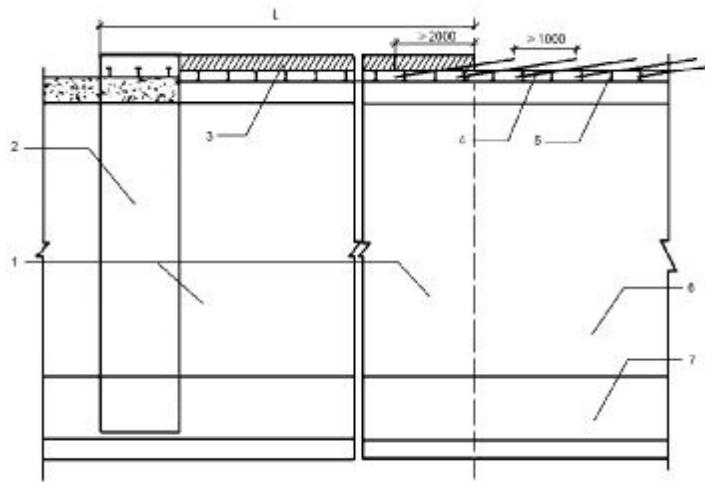


图 5 管棚加固纵剖面示意图

1—管棚加固区段；2—混凝土套拱；3—管棚支护；4—小导管支护；5—钢格栅；6—小导管加固区段；7—仰拱衬砌；L—管棚长度

6.2.4 管棚注浆穿越风险源时需选用止浆塞后退式注浆工艺,因为这种工艺注浆效果均匀,注浆扩散半径可控,能使地层形成较好效果的胶结,粗颗粒地层扩散半径甚至可以达到1m,加固范围大,且在后期开挖时可根据量测结果及时补偿注浆,适合穿越风险源注浆施工。但这种工艺需要加工专用的配套止浆塞和管材中安装特殊的专用单向阀片,注浆施工人员或单位需具有较强的专业能力。

6.3 施工

6.3.1 管棚常用钢管直径为108mm,超前管棚的设计长度一般为10m~30m。因成孔难度的原因,卵砾石地层管棚的设计长度一般不超过20m,黏土、粉质黏土地层成孔容易,管棚设计长度可超过30m。

管口止浆板一般采用20mm厚钢板制作,中间钻有直径约20mm带有螺纹的注浆孔,并安装阀门,用以连接注浆管(图6)。

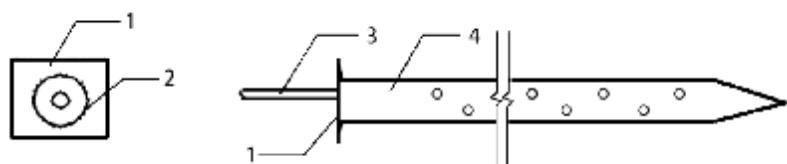


图 6 棚管管口止浆示意图

1—钢板；2—焊缝；3—小导管（与注浆管连接）；4—棚管

6.3.2 由于管棚较长,当方向偏差较大时会造成管棚侵入隧道开挖线,影响后续施工,因此,棚管设置时需充分考虑到上抬量和上抬角度,正确确定孔口位置及倾角、方向,导向钢管的外插角一般为 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$,以防管棚钻机钻进施工时侵入洞身开挖断面。孔口导向钢管的设置至关重要,直接影响管棚的质量,因此要求须定位准确、固定牢固。

6.3.3 含水砂层、卵砾石层等自稳能力较差的地层适宜采用偏心潜孔锤直接将管棚管以套管的形式带入。钻孔初期先低速低压钻进,有利于控制钻孔质量,防止孔位及钻进角度偏差过大,钻进同时运用测斜仪测量钻孔偏斜度,及时纠正。

6.3.4 直接对齐拼焊的大管棚连接方式,易造成管棚管不同心和脱焊,因此不建议采用。管棚管外衬套管连接示意见图7。丝扣连接时,一般丝扣长度不小于150mm。

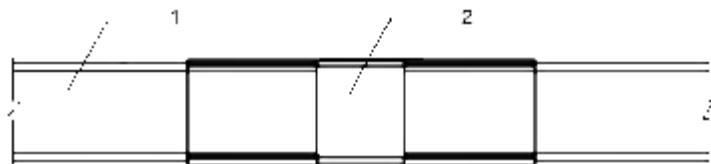


图7 管棚套管连接示意图

1—棚管；2—连接钢管

6.3.7 为确保注浆效果,防止串浆,本条规定施工时每打一个注浆管,就需及时注浆。

6.3.8 一序管棚孔的注浆一般以定量结束标准为主。由于两侧孔已进行过注浆,二序管棚孔注浆一般以定压结束标准为主。

6.3.9 未达到本规程第6.3.8条的终孔条件,需根据相邻管棚注浆量大小,合理判断是否可以终止单孔注浆,当相邻各孔注浆量较大时,可以终止单孔注浆,当相邻各孔注浆量也较小时,须进行补孔注浆。

6.3.10 当本循环90%以上的注浆孔都达到本规程第6.3.8条的终孔条件,其余按本规程第6.3.7条的要求进行处理后,可视为本循环超前管棚注浆完成。

7 帷幕注浆

7.1 一般规定

7.1.1 帷幕注浆是通过预注浆在开挖面或开挖区域周边形成一定厚度的加固体或止水帷幕，为达到防塌限沉、减弱对周边构筑物影响、止水、提高开挖安全性等目的，隧道工程施工时一般采用超前帷幕预注浆。

7.1.2 隧道内水平帷幕注浆，当隧道开挖区域及周边地层富水且地层稳定性差一般采取全断面帷幕注浆；当地层稳定性好主要以封堵地下水为主，一般采用周边帷幕注浆；地层稳定性差地下水相对较小时，一般采用半断面帷幕注浆，对隧道拱顶以上范围及开挖面进行加固，保证隧道开挖稳定性。在条件具备的前提下，地表有条件实施的帷幕注浆，优先采用地表帷幕注浆。

7.1.3 隧道地下工程中帷幕注浆施工主要采用四种注浆方式进行，分别是全孔一次性、钻杆后退式、分段前进式、袖阀管后退式。这四种方法的工艺特点如下：

1 单孔一次性注浆

单孔一次性注浆方式是指按设计将注浆钻孔一次完成，在钻孔内安设注浆管或孔口管，然后直接将注浆管路和注浆管（或孔口管）连接进行注浆施工。单孔一次性注浆方式模式如图 8 所示。

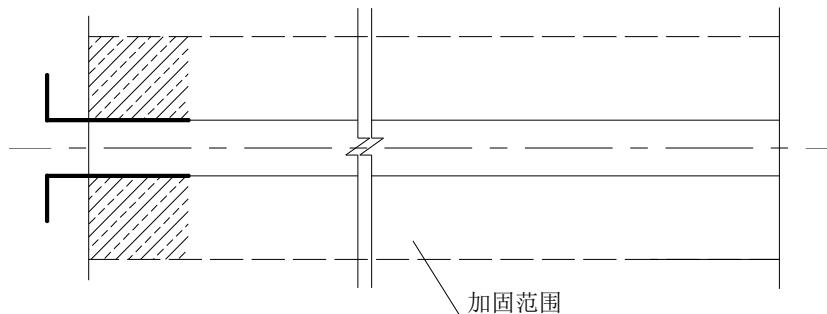


图 8 单孔一次性注浆施工模式图

2 钻杆后退式注浆

钻杆后退式的注浆方式包含单管工艺和双管工艺，就是先钻孔至设计孔深，然后边提钻杆边注浆的施工工艺，因止浆工艺的需要，在隧道水平方向钻杆后退式注浆止水一般都采用双管工艺。

双管的注浆材料采用水泥-水玻璃双液浆或改性水玻璃浆。该工法的优点是实现了长距离的深孔注浆，相对于传统的小导管注浆工艺扩大了注浆加固范围。缺点是该工艺仅能使用速凝材料的水泥-水玻璃或改性水玻璃浆，液浆固结体的有效强度只能

维持在数月左右的时间,过后浆液将分散流失,在隧道壁上出现白色挂浆痕迹,所以双管后退式注浆一般在注浆加固效果要求时间不长的临时性注浆止水中使用,不适宜在对沉降要求较高的近接风险源或构筑物施工时使用。

钻杆后退式注浆在一定程度上实现了分段进行,较单孔一次性注浆方式在工艺上有先进性,但钻杆和地层之间的空隙密封问题是该注浆方式能否实现有效分段的关键,注浆加固效果有较大的随机性,一般不在高要求的注浆工程中采用。钻杆后退式注浆模式如图 9 所示。

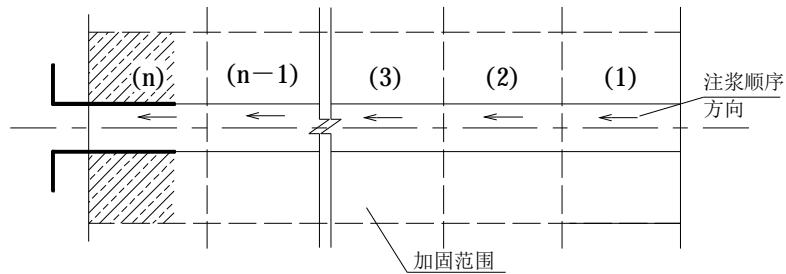


图 9 钻杆后退式注浆施工模式图

3 分段前进式注浆

前进式分段注浆是采取钻、注交替作业的一种注浆方式,即在施工中,实施钻一段、注一段,再钻一段、再注一段的钻、注交替方式进行钻孔注浆施工。每次钻孔注浆分段长度 2m~5m,前进式分段注浆可采用水囊式止浆塞或孔口管法兰盘进行止浆。工艺特点要求采用早强速凝的浆液,水泥-水玻璃双液浆和硫铝酸盐基注浆材料是通常使用的两种快凝型的浆液,硫铝酸盐基特种加固注浆材料既有双液浆早强快凝的特点,也有水泥基材料永久加固的性能,被普遍采用。近年来国内普遍采用性能类似的掺加高性能注浆改性剂的普通硅酸盐水泥代替硫铝酸盐基注浆材料,以降低工程造价。前进式分段注浆钻孔注浆施工模式图如图 10 所示。

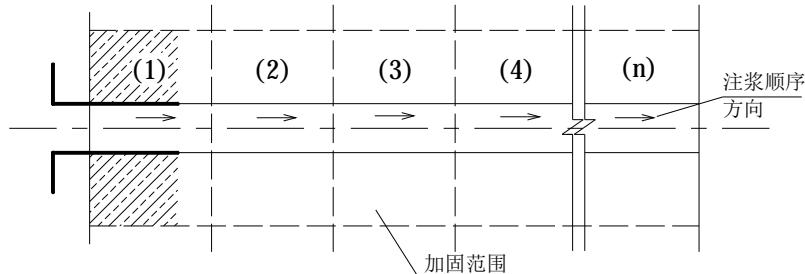


图 10 前进式分段钻孔注浆施工模式图

4 后退式分段注浆

该工法原理步骤是:首先,用钻机进行套管钻孔,一直钻到规定的深度为止,插

入具有特殊构造的带环箍的管子。然后，一边拔出套管一边注入水泥膨润土液，在管子周围形成和土层接触的硬度。在带环箍管子内，将前端装置着双层密封器的注浆管固定在规定的注浆孔位置上，用水或药液打开注浆孔，突破硬壁后进行注浆，如图 11 所示。

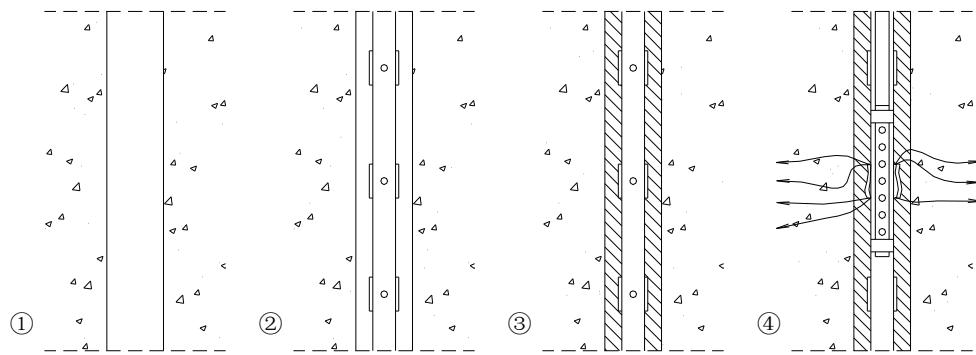


图 11 袖阀管注浆施工模式图

袖阀管后退式分段注浆是目前国内外公认的最可靠的后退式分段注浆工法，国内外众多地铁工程均大量采用该注浆工法。

袖阀管注浆工法的机理是通过封管和注浆两种材料进行分次封孔和注浆，实现分次注浆的可能。通常，每一个工程的地质条件、颗粒粒径、透水性和不同地层之间交互层叠。由于不均匀地层的各层透水性不同，通过注浆的所达到的效果也不尽相同，有针对性地对注浆地层进行分析，在可注性好的地层进行针对性注浆，不同的地层采用不同的注浆材料。有效地填补地层的空隙，使地层得到有效的加固处理，达到设计要求。使地层特性达到同性化。并可以通过二次注浆弥补注浆缺陷。二次注浆时需注意注浆材料的浸透性，注浆速度也需有所重视。工法特点如下：

- 1) 能有效地按注浆工程的设计要求，确定注浆的位置和范围；
- 2) 不易产生注浆盲区和薄弱区，适合高风险注浆施工，如隔水帷幕墙；
- 3) 注浆的位置可根据实际情况上下调整，随意变动；
- 4) 同一注入点可以采用不同的注浆材料进行注浆；
- 5) 注入后，可根据地层的实际情况非常方便地再次注入，保证注浆质量。

7.2 设 计

7.2.1 注浆设计程序可如图 12 所示进行。

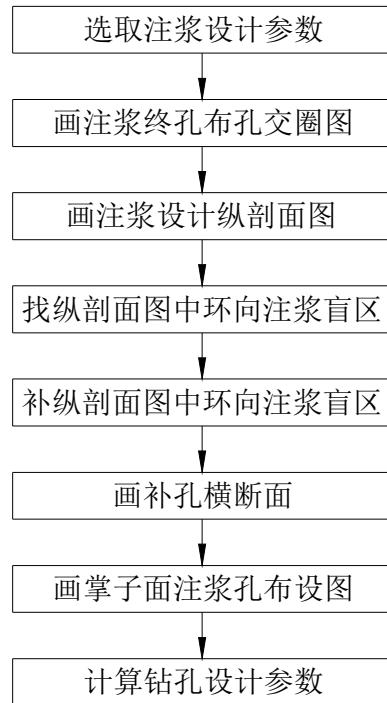


图 12 注浆设计程序

7.2.2 止浆墙可采用喷射混凝土或模筑混凝土的方法施作, 止浆墙施作类型和厚度设计受以下因素的制约: 注浆工艺、注浆最大压力、止浆墙面积、止浆墙结构等。但止浆墙最小厚度须不小于 500mm。

7.2.3 注浆范围厚度 (B) 是指隧道环向注浆加固范围, 在注浆加固和止水设计时, 对于注浆加固范围的选取, 须综合考虑地质条件和水压力数值、注浆效果、成本和注浆工期要求。

7.2.6 注浆孔的布置须保证各注浆孔浆液扩散范围的搭接, 能够形成连续的帷幕。

7.3 施工

7.3.1 止浆墙施作完成后要检查密封情况, 重点检查部位是止浆墙顶部与隧道拱顶的密贴是否紧密, 如果有较大缝隙 (10mm 以上), 须采用棉纱和快硬水泥提前封堵, 对于较小的缝隙, 可在注浆过程中采用注双液浆或快硬水泥的方式封堵。

7.3.2 在注浆施工中, 由外到内进行注浆, 可以将注浆区域围住形成注浆区域的挤密、压实, 有效地实现约束注浆, 提高注浆效果。同样, 由于浆液存在重力作用, 钻孔中泥沙也会对下部造成堆积, 采用由下至上的逐步提升的注浆顺序也可以提高注浆效果。

在注浆施工中, 当存在着较大的水流时, 会影响注浆效果。由上游到下游的注浆

顺序可以防止上游注浆时浆液顺流而下造成浆液不断流失。

7.3.3 分区注浆可以对每个区域进行注浆试验, 确定每区的注浆材料和注浆参数, 可使注浆效果更加可靠。

7.3.4 跳孔注浆可以有效地逐步实现约束注浆, 使浆液逐渐达到挤压密实, 促进注浆帷幕的连续性, 并且通过逐序提高注浆压力, 利于浆液的扩散和提高浆液结石体的密实性。在注浆施工中, 由于注浆扩散半径是一个选取值, 它不代表浆液在地层中最大的扩散距离。在注浆施工中, 当采取跳孔分序注浆时, 对先序孔采取定量注浆, 对后序孔采取定压注浆可以提高注浆效果。

7.3.6 对涌水涌泥严重的地层一般采用前进式分段注浆工艺, 避免地层损失严重对周边环境造成影响。

7.3.14 注浆过程中常出现管路堵塞、跑浆、串浆等问题时, 主要原因及处理措施一般参照以下表处理:

表 1 注浆管路堵塞原因分析及处理措施

序号	原因分类	原因分析	处理对策
1	材料问题	注浆原材料过期变质	对原材料进行试验, 杜绝使用过期变质的原材料
		水泥浓度过浓	采用高水灰比的浆液
		浆液胶凝时间过短	调整注浆配比, 采用胶凝时间较长的浆液配比参数
2	操作问题	浆液中进入了包装袋或其他杂物	①在配浆桶口采用滤网过滤杂物 ②每个工班清洗一次配浆桶, 将配浆桶中已固结的浆液清除
		混合浆液管路过长	缩短混合浆液管路, 原则上混合浆液管路不超过5m
		水泥浆和水玻璃吸浆管放错	在水泥浆和水玻璃吸浆管上设置标记(通常在水泥浆吸浆管上绑上红布条等进行标记)
		注浆泵缸体中有堵塞	及时清洗注浆泵缸体, 要求每周清洗一次注浆泵缸体
		水泥浆管路中有沉积	在注浆过程中经常采用铁锤敲击水泥浆管路以及混合浆液管路
3	工艺问题	注双液时未采用混合器	在注双液浆时, 须使用混合器, 不允许使用三通
4	地质问题	地层吸不进浆	①选择合理的注浆终压 ②采用高压力注浆泵 ③调整注浆材料, 特别是地层吸浆量小时, 须采取注水泥浆, 不再继续注双液浆

表2 注浆过程跑浆、串浆原因分析及处理措施

序号	原因分类	原因分析	处理对策
1	工艺问题	未施作止浆墙	注浆前须施作止浆墙, 防止掌子面出现跑浆现象
		未对后部进行径向注浆加固处理, 使浆液后返	注浆前须对后部进行径向注浆, 防止浆液后返
		单孔注浆量过大	按定量注浆进行控制, 必要时对多个注浆孔同时进行注浆
		注浆压力过大、注浆速度过快	调整注浆参数, 降低压力和泵速
		钻孔间距离过小	跳孔施工或改为袖阀管注浆工艺
2	操作问题	止浆墙施工质量有问题	加强止浆墙施作质量。出现跑浆时, 可采用双液浆, 调整浆液胶凝时间, 并采取间歇注浆措施, 迅速对接触缝进行堵塞
		后部径向注浆效果差	加强注浆设计, 密封止浆层, 加长孔深和布孔密度

8 局部注浆和径向注浆

8.1 一般规定

8.1.1 局部注浆适用于小范围岩土体的止水与加固。对于临近或穿越风险控制区域、基坑背后局部区域存在漏水等缺陷区域，以及隧道内帷幕注浆施工完成后，开挖施工过程存在的注浆盲区或帷幕薄弱区域进行补充注浆，可采取局部注浆的方式。

8.1.3 因局部注浆往往是对存在缺陷的小范围岩土体进行止水、加固，需要迅速达到止水和加固的目的，因此规定注浆材料采用速凝、早强型注浆材料，以便快速获得止水或加固效果。

地层孔隙较小，普通水泥单液浆可注性差，封堵微小孔隙渗漏水的径向注浆止水工程，可使用超细水泥单液浆，保证有效的可注性。

8.2 设 计

8.2.2 注浆孔布置与局部注浆范围有关，注浆孔间距与浆液在地层流动有关，局部注浆一般作为临时措施，要根据现场情况以及注浆效果，动态确定布孔位置及布孔数量，灵活控制注浆参数。

8.2.5 注浆材料一般采用胶凝时间快的材料如水泥-水玻璃双液浆、改性水玻璃等。

8.2.8 以加固为目的的径向注浆，孔间距一般取较大值（1.5m~3m）；以止水为目的的径向注浆，孔间距一般取较小值（0.5m~1.5m）。径向注浆的孔深取值设计主要的考虑因素是：隧道断面大小、变形程度及允许值、渗水面积、渗水量大小等。

8.3 施 工

8.3.1 局部注浆方式可根据注浆区域的施工情况选择，一般注浆深度不大于5m的浅孔采用小导管全孔一次性注浆的方式；对于深度大于5m时采取钻杆后退式分段注浆工艺；对于基坑围护结构背面等通过地表进行的局部注浆，采取垂直袖阀管后退式分段注浆工艺。当钻孔涌水涌砂严重时，为避免钻孔过程地层损失过大造成周边环境影响，一般通过孔口管，采用分段前进式工艺。

8.3.2 为保证注浆效果，注浆过程采取必要的措施须避免跑浆、漏浆、串浆的发生。

8.3.4 施工过程分序作业，一序孔须在注浆终压控制前提下以量控制为主，二序孔须以注浆压力为主要控制指标。

8.3.6 局部注浆过程可根据注浆效果的好坏，灵活调整注浆布孔位置及布孔数量，确保注浆质量。

8.3.11 未达到本规程第 8.3.10 条的终孔条件，须根据相邻注浆孔注浆量大小，合理判断是否可以终止单孔注浆，当相邻各孔注浆量较大时，可以终止单孔注浆，当相邻各孔注浆量也较小时，须进行补孔注浆。

8.3.12 当本循环 90% 以上的注浆孔都达到本规程第 8.3.10 条的终孔条件，其余按本规程第 8.3.11 条的要求进行处理后，可视为本循环径向注浆完成。

9 矿山法隧道背后填充注浆

9.1 一般规定

9.1.1 填充注浆的目的是对结构外一定范围如初期支护背后或周边围岩的空隙和加固因施工而被扰动的土体，减少地层移位和地表沉降，控制初期支护变形，并作为封堵地下水的一道防线。初期支护和二次衬砌之间的填充注浆主要是填充二次衬砌混凝土收缩造成的空隙，使结构受力均匀，同时阻塞地下水通道，防止地下水沿隧道纵向流动。

9.1.2 填充注浆须在初期支护完成后及时进行，在地表沉降要求严格的地段，初期背后填充注浆的注浆面与开挖面距离一般不大于 5m，并须采用低压力（小于 0.2MPa）注浆，地表沉降不敏感或初期支护变形小的地段，填充注浆可在初期支护成环后进行。

9.1.3 当初期支护出现大面积渗漏水或支护结构变形较大时，须采用径向注浆进行止水或加固。

9.2 设 计

9.2.1 粉土、细砂等细颗粒地层注浆时，浆液扩散影响半径一般取较小值；卵砾石等粗颗粒地层时，浆液扩散影响半径一般取较大值。

9.3 施 工

9.3.6 由于初期支护背后填充注浆量难以确定，因此填充注浆未以注浆量作为终止注浆的条件，而是以注浆压力是否达到设计注浆终压作为终止注浆的条件，当注浆压力逐渐上升，流量逐渐减少，注浆压力达到设计终压后，稳定不少于 3min 或相邻孔出现串浆，可结束单孔注浆。

10 盾构法隧道壁后注浆

10.1 一般规定

10.1.1 盾构法隧道壁后注浆分为同步注浆、即时注浆和二次注浆。

同步注浆是在盾构掘进的同时，通过安装在盾构壳体外侧的注浆管进行壁后注浆的方法；根据注浆的时序，一般在盾构推进后不超过一倍洞径长度内通过管片上的注浆孔进行壁后注浆习惯上称为即时注浆，在盾构推进超过一倍洞径长度后再通过管片上的注浆孔进行壁后注浆称为二次注浆。二次注浆是对壁后注浆的补充，其目的是填充之前注浆未能有效填充和浆液收缩后的空隙，及处理隧道渗漏水。注浆方法、工艺、材料等须根据地层性质、地面荷载、允许变形速率和变形值等合理选定。

10.1.2 同步注浆在盾构推进过程中，可以及时填充盾构掘进与管片拼装留下的不利空隙，支撑管片周围土体，补充由于多种原因所造成地层损失，减少地面沉降，防止地层产生过大变形而危及周围环境安全。因此要求同步注浆及时跟进，保证填充密实，缩短衬砌脱出盾尾的暴露时间，并改良浆液配合比，缩短浆液凝固时间。

10.1.3 二次补注浆主要是弥补同步注浆的不足，有效填充同步注浆未到达区域以及同步注浆的硬化收缩空隙。当盾构推进过后发现地表沉降趋势变大，或雷达检测管片外有不实空洞，需进行二次注浆。当盾构通过邻近建构筑物等风险较大地段，或为了提高抗渗透性，也需进行二次注浆。一般在盾构通过3环~5环后，及时打开管片上预留的注浆孔进行二次注浆，以弥补同步注浆的不足。

10.2 设 计

10.2.2 盾构注浆中常采用一种惰性浆液，主要由粉煤灰、砂、膨润土、水和外添加剂等组成，不掺加水泥等胶凝材料。这种浆液在盾构施工中被广泛应用，因其流动性、稠度、分层度和凝结时间都能满足施工需求，且通过调节添加剂的掺入量可以有效地控制浆液的性能，以适应不同地层和掘进进度的要求。此外，惰性浆液的配料简单，制造成本低，生产容易，施工管理方便，能够有效防止环缝渗漏，控制地面沉降在允许范围之内。但在盾构穿越重要建筑物、桥梁等对地面沉降要求较高及环境保护要求高的地段时，要求盾构施工对环境影响最小，因此常采用双液浆液，可以保证被加固土体快速固结，减小沉降量，降低对周边环境的影响。

10.2.3 注浆材料的选用须按地质条件及环保要求并经试验合理选定，要求如下：

1 注浆作业全过程浆液不易产生离析；

- 2 具有较好的流动性，易于注浆施工；
- 3 压注后浆液固化收缩率小；
- 4 有较好的不透水性能；
- 5 压注后强度能很快超过土层；
- 6 注浆前进行材料试验，符合要求后方可使用。

壁后注浆材料要求流动性好，便于盾构移动过程中持续不停地注浆。二次注浆材料要求可注性强，能补充同步注浆的缺陷，对同步注浆起填充和补充作用。

10.2.5 本条给出了同步注浆的设计注浆量的理论计算公式，实际注浆量会受到地质条件、注浆压力和超挖量等因素影响，当地层土质较软、裂隙较多时，浆液渗入较远，注浆量会明显增多；注浆压力偏大时，浆液在高压作用下会向土体压密，用浆量会增加；在曲线段推进时，由于纠集或者调整姿态造成超挖，也需用注浆的方式来弥补岩体间的空隙。因此，实际注浆时需根据地层情况及时调整，达到填充密实的效果。

10.2.6 注浆量填充系数是评价其注浆效果的重要指标。注浆量填充系数是指实际注浆量与理论注浆量的比值，是衡量注浆效果好坏的重要参数。在地下工程中，注浆量填充系数的大小直接影响着被加固地层的稳定性和工程的安全。

施工中注浆量须根据注浆效果调整，注浆量与盾构掘进时扰动土层的范围有关系，因扰动范围是变量，考虑盾构纠偏超挖、跑浆、浆液收缩等因素，实际注浆量一般为理论计算量的 1.3 倍~2.5 倍，即填充系数 λ 取 1.3~2.5。通常情况下壁后注浆填充系数取 1.3~1.8；在极松软或地下水量大的地段，填充系数取 1.5~2.5，并通过地面变形监测数据适时调整。

10.2.7 同步注浆时要求在地层中的浆液压力大于该点的静止水压及土压力之和，做到尽量填补而不劈裂。注浆压力过大，出现浆液溢出地面或造成地表隆起，管壁外面土层将会被浆液扰动而造成后期地层沉降及隧道本身的沉降，并易造成跑浆；而注浆压力过小，浆液填充速度过慢，填充不充足，会使地表变形增大，通常同步注浆压力一般为 1.1 倍~1.2 倍的静止土压力与静止水压力之和，可根据隧道埋深计算。

注浆出口压力一般稍大于注浆出口处的静止土压力，注浆压力通常大于出口处压力 0.1MPa~0.2MPa。通过计算的注浆压力也无需过大，导致浆液溢出地面或造成地表隆起，也无需过小而减弱注浆作用。

10.2.8 同步注浆非常重要的参数就是要建立注浆流量与盾构推进的关系。如果注浆流量大于盾构推进的速度，则浆液会发生跑浆现象，甚至会穿过盾尾进入盾构机内，

污染拼装的工作面；注浆流量小于盾构前进的速度，则会在盾尾脱出的部位因注浆量不足造成一定的沉降。因此需按盾构推进速度计算、注浆量计算注浆流量。施工中也需严格控制盾构推进速度，确保推进速度和同步注浆速度相适应。

10.2.9 管片常利用吊装孔兼做二次注浆预留孔用。

10.3 施工

10.3.2 注浆压力和注浆量是直接影响地面沉降的关键因素，配备对注浆量、注浆压力、注浆时间等参数进行自动记录的仪器和系统可在施工中及时、严格、准确地按规定程序和下达的施工指令进行注浆操作，精确控制注浆压力和注浆量。

10.3.4 同步注浆时，注浆压力控制很重要，压力太大容易造成拼装完成后的管环上浮、地表鼓起、破坏盾尾密封，及可能造成浆液顺着盾壳外壁流到刀盘前面造成土体压力增大影响正常掘进等情况，过小则会造成注浆量不足，地层变形过大等问题。

10.3.5 注浆结束后须在一定压力下关闭浆液分配系统，同时打开回路管，停止注浆。注浆管路内压力降至零后拆下管路进行清洗。

10.3.7 同步注浆的目的是及时填充盾构掘进与管片拼装留下的不利空隙，防止地层产生过大变形而危及周围环境安全，因此关键是同步。要求同步注浆及时跟进，保证填充密实，缩短衬砌脱出盾尾的暴露时间。因此本条要求当同步注浆作业发生故障时，须立即停止盾构掘进，及时排除故障，掘进过程坚决执行“掘进与注浆同步，不注浆，不掘进”的原则。同步的第二层含义是建立注浆流量与盾构推进速度的关系。

10.3.10 二次注浆因为水泥—水玻璃混合浆液凝固时间相当快，两种液体混合后一般凝固时间大约为 20s，当注浆孔距离盾尾较近时，浆液容易从盾尾处流出或流到刀盘影响施工。因此二次注浆一般要求在同步注浆完成大约 1d 后进行，或距盾尾约 5 环后的位置开始注浆。

10.3.15 因为水泥—水玻璃混合浆液凝固时间相当快，两种液体混合后一般凝固时间大约为 20s，当注浆孔距离盾尾较近时，浆液容易从盾尾处流出或流到刀盘影响施工。因此本条规定二次注浆需在距盾尾约 5 环后的位置开始注浆。

同样，因为浆液凝固较快，容易堵塞注浆设备管道，因此注浆完成后需及时清洗注浆设备。

10.3.21 盾构穿越风险源前须对盾构及其配套设备进行全面检查，对有问题的设备及时维修和更换，避免盾构在区间穿越时，因为盾构设备故障停机检修。检修的主要设备：盾尾密封刷、同步注浆设备和管路、铰接密封、出土设备、液压系统、油脂注入

系统等，避免穿越中因设备问题出现停机等情况，保证连续均速通过。

11 注浆效果检查

11.2 效果检查

11.2.2 注浆效果检查方法如下：

1 *P-q-t* 曲线法：采用 *P-q-t* 曲线法评价注浆效果时，根据所记录的注浆压力(*P*)、注浆速度(*q*)、注浆时间(*t*)三者之间的关系，绘制的 *P-q-t* 曲线图进行分析（图 13）。单孔注浆施工中 *P-t* 曲线呈上升趋势，*q-t* 曲线呈下降趋势。

注浆结束时，*P-t* 曲线显示注浆压力达到设计终压，或 *q-t* 曲线显示单孔注浆量达到设计量的 2 倍，可认为单孔注浆满足合格标准。满足合格标准的注浆孔数量一般大于 80%。

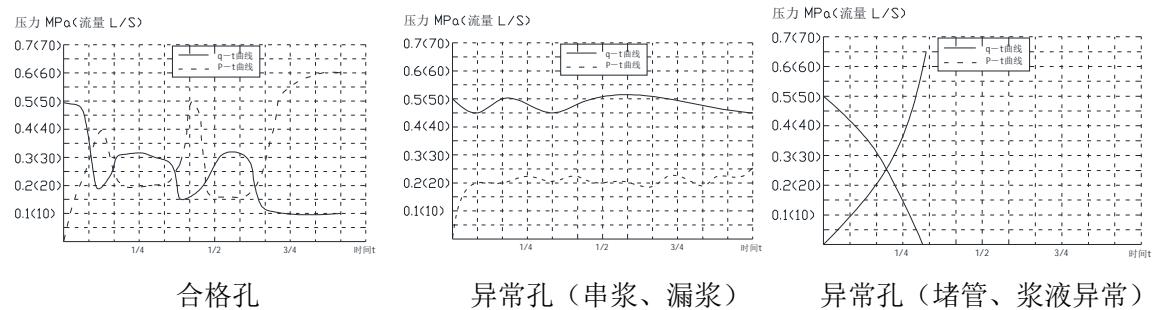


图 13 注浆孔典型 *P-q-t* 曲线图

2 涌水量对比法：采用涌水量对比法分析注浆效果时，对比注浆前后钻孔涌水量变化数值，随着注浆进行，钻孔涌水量不断减少，通过注浆止水率公式（1）计算出结果。

$$g = (1 - \frac{m_{\text{检}}}{m_{\text{探}}}) \times 100\% \quad (1)$$

式中： g —注浆施工前后止水率；

$m_{\text{检}}$ —注浆结束后检查孔单位长度单位时间内的涌水量（L/（m·min））；

$m_{\text{探}}$ —注浆开始前探孔单位长度单位时间内的涌水量（L/（m·min））。

加固目的注浆工程止水率一般大于 80%，止水目的注浆工程止水率一般大于 90%。

3 填充率反算法：采用浆液填充率反算法注浆效果时，采用注浆总量计算公式(2)反算浆液填充率，根据计算结果评价注浆效果。

$$a = \frac{Q}{V \times n \times b} \quad (2)$$

式中： V —注浆加固体体积（m³）；

其他符号见本规程第 2.2 节。

加固目的注浆工程浆液填充率一般大于 80%，止水目的注浆工程浆液填充率一般大于 90%。

4 取芯孔法：采用检查孔取芯法分析注浆效果时，取芯孔布设在相邻孔交界的注浆效果薄弱部位，通过取芯率、芯样的完整性、芯样的浆液含量、芯样强度试验等进行综合分析判断。

止水目的的注浆工程芯样无侧限抗压强度一般大于 0.3MPa 以上，加固目的的注浆工程一般大于 0.5MPa。采用普通硅酸盐水泥、超细水泥等为浆液主材的注浆工程，取芯作业一般在注浆结束后 7d 进行；采用硫铝酸盐水泥等为浆液主材的注浆工程，取芯作业一般在注浆结束后 1d 进行；采用水泥-水玻璃双液浆为浆液主材的注浆工程，因浆液固结体为脆性，且强度较低，芯样易碎，不适宜采用取芯试验强度的方法检查，但可采用取芯观察的方法检查。

对于非渗透为主的地层注浆加固后，由于原位取样试件难以满足无侧限抗压强度测试要求或取得试件无法证实反映加固后强度时，一般采取动力触探的方式进行强度测试，即以止水为目的的注浆采取动力触探强度一般大于 300kPa 以上，已加固目的的注浆工程一般大于 500kPa。

5 检查孔法：采用检查孔法观察注浆效果时，检查孔布设在相邻孔交界的注浆效果薄弱部位，观察检查孔成孔是否完整、涌水、涌砂、涌泥及坍孔等定性评定注浆效果。

检查孔成孔完整，无涌砂、涌泥现象，出水量小于注浆专项设计要求，且能保持 1h 以上。

6 渗透系数测试法：采用检查孔渗透系数测试法分析注浆效果时，是采用压水试验测试注浆前后地层渗透系数变化，判定注浆效果。如果地层对注水敏感，工程不适合做压水试验，一般采用浆液代替清水，但浆液的水灰比须大于 1.2:1。

注浆后地层的渗透系数公式（3）须降低一个数量级，且止水目的深孔注浆施工时地层的渗透系数须小于 10^{-2}m/d 。

$$k_g = \frac{0.366 Q}{l_s} \lg \frac{2l}{r} \quad (3)$$

式中： k_g —注浆后地层渗透系数（ m/d ）；

Q —稳定流量（ m^3/d ）；

l —试验段长 (m) ;

s —水位差 (m) , 也可用注浆压力替代 (指水头压力高度, m) ;

r —钻孔半径 (m) 。

7 直接观察法: 采用直接观察法了解注浆效果时, 是通过对隧道开挖面进行观察, 宏观评定注浆加固效果。

开挖面掌子面一般浆液填充饱满, 能自稳, 无水或少水, 且满足安全要求; 径向注浆、填充注浆后隧道周围渗漏水明显减少。

8 监测数据判定法: 采用监测数据评价注浆效果时, 是对注浆前后的帷幕止水圈内外水位高程、隧道初期支护的变形速率、地表沉降速率等数据进行分析, 判断注浆加固效果是否达到工程要求。

9 雷达物探法: 采用雷达物探的方法评价注浆效果时, 是根据注浆施工前后雷达成果图像的差异和雷达物探手段的专业知识, 宏观评定注浆效果是否达到工程要求。