

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

团体标准

T/UGEHB XXXXX—XXXX

高地应力隧道软弱破碎围岩超前注浆技术规程

(征求意见稿)

XX—XX—XX 发布

XX—XX—XX 实施

湖北省地下工程学会 发布

前 言

本规程按照 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。

本规程针对高地应力软弱破碎围岩隧道施工中面临的成孔难、注浆难、扩散难及易塌孔变形等技术难题，在广泛调研的基础上，总结近年来国内外相关工程实践经验和科研成果，按照工程建设标准管理规定，对高地应力隧道软弱破碎围岩的超前注浆技术进行了规定。

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。

本规范的主要技术内容是：1 总则；2 规范性引用文件；3 术语和符号；4 基本规定；5 软弱破碎围岩专项勘察与分类；6 注浆材料与设计；7 注浆设备；8 施工工艺；9 施工质量检查与评估方法；10 安全与环保；附录。

本规范由湖北省地下工程学会学会归口管理，由武汉大学提出并负责具体技术条款的解释。采用过程中如有意见或建议，请寄送武汉大学（地址：湖北省武汉市武昌区八一路 299 号，邮编：430072，邮箱：chunjiang.zou@whu.edu.cn，电话：027-68752059）。

本规程主编单位：武汉大学

本规程参编单位：中国水利水电第十四工程局有限公司、中国水利水电第七工程局有限公司

本规程主要起草人：吴志军、翁磊、邹春江、储昭飞、吴龙骥、陈鹤、龙亮、侯孝军、何一林、张春芳、蒲华林、罗冉、龚兵文

本规程为首次发布。

目 次

1	总 则.....	1
2	规范性引用文件.....	2
3	术语和符号.....	3
3.1	术语.....	3
3.2	符号.....	4
4	基本规定.....	6
5	软弱破碎围岩专项勘察与分类.....	7
5.1	一般规定.....	7
5.2	勘察目的与内容.....	7
5.3	勘察方法与技术要求.....	8
5.4	勘察成果运用.....	8
6	注浆材料与设计.....	9
6.1	注浆设计原则.....	9
6.2	注浆方案选择.....	9
6.3	注浆参数设计.....	11
6.4	注浆材料.....	13
7	注浆设备.....	17
7.1	一般规定.....	17
7.2	钻孔系统.....	17
7.3	制浆与储浆系统.....	18
7.4	注浆系统.....	18
7.5	监测与控制系统.....	19
7.6	安全防护系统.....	19
8	施工工艺.....	21
8.1	一般规定.....	21

8.2	施工准备.....	22
8.3	钻孔.....	23
8.4	安装.....	23
8.5	压水试验.....	24
8.6	浆液制备.....	25
8.7	注浆作业.....	26
8.8	移孔.....	28
8.9	效果检查与补注浆.....	28
9	施工质量检查与评估方法.....	31
9.1	一般规定.....	31
9.2	检查与评估方法.....	31
9.3	检查点布置与数量.....	33
9.4	验收合格标准.....	33
9.5	不合格处理.....	34
10	安全与环保.....	35
10.1	一般规定.....	35
10.2	安全施工措施.....	35
10.3	环境保护措施.....	36
附录 A	(资料性附录) 常用浆液材料及其性能指标.....	38
附录 B	(资料性附录) 注浆施工记录表格式.....	39
附录 C	(资料性附录) 质量检验报告格式.....	42

contents

1	General Provisions	1
2	Normative references	2
3	Terms and Symbols	3
3.1	Terms	3
3.2	symbol	4
4	Basic Provisions	6
5	Special Investigation and Classification of Weak and Broken Surrounding Rock	7
5.1	General Provisions	7
5.2	Purpose and Scope of the Survey	7
5.3	Survey Methods and Technical Requirements	8
5.4	Application of Survey Results	8
6	Grouting Materials and Design	9
6.1	Principles of Grouting Design	9
6.2	Grouting Scheme Selection	9
6.3	Grouting Parameter Design	11
6.4	Grouting Materials	13
7	Grouting Equipment	17
7.1	General Provisions	17
7.2	Drilling System	17
7.3	Pulp Preparation and Storage System	18
7.4	Grouting System	18
7.5	Monitoring and Control Systems	19
7.6	Safety Protection System	19
8	Construction Techniques	21
8.1	General Provisions	21
8.2	Construction Preparation	22

8.3	Drilling	23
8.4	Installation	23
8.5	Water Pressure Test	24
8.6	Preparation of Lysate	25
8.7	Grouting Operations	26
8.8	Transplantation	28
8.9	Effect Verification and Re-injection	28
9	Construction Quality Inspection and Evaluation Methods	31
9.1	General Provisions	31
9.2	Inspection and Evaluation Methods	31
9.3	Layout and Quantity of Checkpoints	33
9.4	Acceptance Criteria	33
9.5	Non-conformity Handling	34
10	Safety and Environmental Protection	35
10.1	General Provisions	35
10.2	Safety Construction Measures	35
10.3	Environmental Protection Measures	36
Appendix A	(Reference Appendix) Commonly Used Serous Materials and Their Performance Indicators.....	38
Appendix B	(Reference Appendix) Grouting Construction Record Form.....	39
Appendix C	(Reference Appendix) Format of Quality Inspection Report.....	42

1 总 则

1.0.1 为规范红层软岩水工隧洞设计，做到安全可靠、技术先进、经济合理，制定本规范。

1.0.2 本规程规定了高地应力软弱破碎围岩注浆技术的术语和定义、基本规定、地质勘察、方案设计、材料选择、施工工艺、质量检验及安全环保要求。

1.0.3 本规程适用于铁（公）路隧道、水工隧洞、深部矿山等地下工程中，遇到高地应力软弱破碎围岩时，以加固和堵水为目的的注浆工程。

2 规范性引用文件

2.0.1 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 50086 岩土锚杆与喷射混凝土支护技术规范
- GB/T 50218 工程岩体分级标准
- JTG/T 3660 公路隧道施工技术规范
- DL/T 5406 水工建筑物化学灌浆施工规范
- GB/T 51320 建设工程化学灌浆材料应用技术标准

3 术语和符号

3.1 术语

3.1.1 高地应力(High geo-stress)

岩体中初始地应力水平较高，其量值足以导致地下工程开挖后，引发围岩显著塑性变形、持续流变或大变形等有害现象的原岩应力状态。

注：通常可根据强度应力比（岩石单轴饱和抗压强度与最大主应力之比）进行判定，当该比值小于 4-6 时，应认定为高地应力。

3.1.2 软弱破碎围岩(Weak and fractured surrounding rock)

强度低、结构面发育、完整性差、自稳能力弱的岩体。

注：一般表现为岩石单轴饱和抗压强度低（如 $<30\text{MPa}$ ）、岩体完整性系数低（如 <0.55 ）、节理裂隙密集且有泥质充填。

3.1.3 注浆(Grouting)

通过注入一定的浆液，使其渗透到地层孔隙和裂缝中，从而改变原地层的物理性质，使其达到一定的稳定性。

3.1.4 注浆材料(Grouting material)

在压力作用下能注入岩体裂隙或孔隙，经物理或化学作用固化，起到加固、堵水等作用的材料。

3.1.5 高压持续注浆(High-pressure sustained grouting)

针对高地应力围岩变形持续的特点，采用较高注浆压力（通常高于常规压力 1.5 倍以上），并在一定压力下稳压持续一段时间，以充分挤密和胶结破碎岩体的注浆工艺。

3.1.6 脉冲注浆(Pulse grouting)

在注浆过程中，通过周期性或非周期性地改变注浆压力或流量，利用压力波动产生的脉冲能量促进浆液在裂隙中的劈裂扩展和渗透，以克服高地应力对浆液扩散的抑制作用的注浆工艺。

3.2 符号

3.2.1 几何参数

R_0 —等效理论扩散半径 (m)；

L —试验段长 (m)。

3.2.2 物理力学参数

P_w —裂隙水压力 (MPa)；

P_{start} —初始压力，即起始注浆压力 (MPa)；

σ_3 —围岩最小主应力 (MPa)；

P_{max} —最大允许压力，即注浆最大允许压力 (MPa)；

P_{end} —终压，即注浆结束注浆压力 (MPa)；

k —平均渗透系数 (m/s)；

R_{max} —优势方向半径 (m)；

R_{min} —垂直方向半径 (m)；

P —注浆压力 (Pa)；

t —注浆时间 (s)；

n —围岩裂隙率或孔隙率；

μ —浆液粘度 (Pa·s)；

λ_1 —优势方向扩散系数；

λ_2 —受阻方向扩散系数。

q —透水率 (Lu) ;

Q —最后一级压力下的稳定流量 (L/min) ;

P_f —最后一级施加压力 (MPa) 。

4 基本规定

4.0.1 高地应力软弱破碎围岩地段的注浆工程，应作为地下工程施工安全风险控制的重点环节，必须进行专项设计、专项施工和专项验收。

4.0.2 注浆工程应遵循“动态设计、信息化施工”的原则，根据地质预报和监测数据及时调整方案。

4.0.3 注浆方案必须与初期支护结构（如锚杆、钢架、喷射混凝土）协同设计，形成联合承载体系。

4.0.4 注浆施工前应进行现场试验，确定合适的浆液配比、注浆压力、扩散半径等关键参数。

4.0.5 应高度重视高地应力环境下，注浆施工可能诱发的围岩应力调整和变形，制定安全预案。

5 软弱破碎围岩专项勘察与分类

5.1 一般规定

5.1.1 本章规定的勘察内容旨在为高地应力软弱破碎围岩地段的脉冲注浆设计提供直接、可靠的地质依据。

5.1.2 专项勘察工作应采用“宏观预报与精细探测”相结合的方法，分阶段、由面到点地逐步精确查明不良地质体的空间分布和力学环境。

5.2 勘察目的与内容

专项勘察应实现以下目的并获取相应参数：

5.2.1 确定软弱破碎带的空间边界与内部特征

1 精确空间定位：查明软弱破碎带在隧道轴线方向上的起讫里程、纵向宽度，以及沿隧道断面方向的分布范围（拱顶、边墙、仰拱）。

2 内部结构特征：调查岩体的破碎程度（块度尺寸、裂隙密度）、结构面的产状、张开度及充填物性质（特别是泥质含量）。

3 物理力学指标：获取破碎岩体的单轴抗压强度、渗透系数等关键参数。

5.2.2 掌握地应力场特征

1 地应力大小与方向：测定最大水平主应力、最小水平主应力和垂直应力的量值与方向。

2 应力状态分析：明确地应力场类型，分析最大主应力方向与隧道轴线的空间关系，评估其对洞室稳定性和注浆浆脉走向的影响。

5.2.3 查明水文地质条件

查明地下水水位、水压、流速及与破碎带的联通性，评估水流对注浆浆液的冲刷稀释作用。

5.3 勘察方法与技术要求

勘察阶段、勘察推荐方法及技术要求等按下表执行：

表 5.1 勘察方法与技术要求

勘察阶段	勘察目的	推荐方法	技术要求
阶段 1：长距离宏观预报	1. 初步识别潜在软弱破碎区 2. 判断地应力相对高低区	1. 弹性波反射法（TSP） 2. 地质雷达（GPR）	1. 预报距离 100-150 米。 2. 输出成果：不良地质体概化模型图，标示可能的高应力区与破碎区。
阶段 2：短距离精细探测	1. 精确圈定软弱破碎带边界 2. 揭示内部结构	1. 超前水平钻探 2. 钻孔数字成像 3. 孔内弹性波测试	1. 钻探长度 30-50 米，重叠搭接 5-8 米。 2. 输出成果：钻孔柱状图、孔内影像图、岩体完整性系数（K _v ）、RQD 值。
阶段 3：掌子面及周边详查	1. 验证预报精度 2. 获取详细设计参数	1. 掌子面地质编录 2. 短探孔测试 3. 地应力现场测量	1. 进行节理裂隙统计。 2. 输出成果：掌子面地质展布图、裂隙玫瑰花图、地应力测量报告。

5.4 勘察成果运用

勘察工作获取的所有数据和结论，应直接应用于脉冲注浆专项设计，主要包括：

1 注浆段划分与孔位布置：根据精确圈定的软弱破碎带范围，确定脉冲注浆的起止段落，并布设注浆孔和检查孔。

2 注浆参数设计：根据破碎程度和渗透系数，确定浆液的类型和起始水灰比；根据地应力大小和方向，初步设定脉冲注浆的峰值压力、稳压时间和频率，确保注浆压力既能有效渗透挤密，又不会引起有害的水力劈裂。

3 风险预判：根据水文地质条件，预判高压注浆可能引起的涌水变化风险，并制定应对预案。

6 注浆材料与设计

6.1 注浆设计原则

注浆设计应以提高围岩承载力、形成有效承载圈、降低渗透性为核心目标，遵循“先固结、后封水”、“深孔高压、分段注浆”的技术路线，优先加固深部围岩，降低围岩渗透性，并改善其应力分布状态。注浆设计应满足以下原则与目标：

6.1.1 安全可靠原则：注浆设计应以保障隧道施工期及运营期安全为首要目标，通过注浆加固提高围岩整体稳定性、有效控制变形发展并显著增强其抗渗性。

6.1.2 动态适应性原则：注浆方案应根据地质预报与监测数据实时调整设计参数，适应围岩条件变化。

6.1.3 协同支护原则：注浆需与锚杆、钢架、喷射混凝土等初期支护措施协同设计，形成联合承载体系，共同抵御高地应力影响。

6.1.4 堵水与加固并重原则：注浆设计应兼顾提高围岩承载力和封堵地下水，降低渗透压力，防止渗流破坏，确保围岩长期稳定。

6.1.5 分序加密原则：注浆施工宜采用分序、间隔、加密的工艺，确保浆液均匀扩散，形成连续有效的加固圈。

6.1.6 注浆设计的目标，主要包括：

- 1 提高围岩承载力：**通过浆液固化提高软弱破碎岩体强度和变形模量；
- 2 形成有效承载圈：**在隧道围岩周边形成一定厚度的加固圈，改善应力分布；
- 3 降低渗透性：**充填裂隙，减少地下水渗透，防止围岩软化及保持围岩长期稳定；
- 4 控制围岩变形：**抑制高地应力场下隧道围岩的塑性变形和长期流变性。

6.2 注浆方案选择

注浆方案应根据工程地质条件、水文地质特征、隧道结构要求及施工条件等因素综合确定，选择以水泥基为主、化学浆为辅的注浆体系，常见注浆方案包括：

6.2.1 全断面帷幕注浆

1 适用条件：围岩破碎范围大、地下水丰富、隧道断面整体稳定性差的地段。

2 技术要点：在隧道开挖轮廓线外形成闭合的注浆帷幕，注浆孔按环形或梅花形布置，孔深应穿过破碎带进入稳定岩层不少于 2.0m。

6.2.2 周边径向注浆

1 适用条件：局部围岩变形显著、初期支护出现裂缝或渗水的区域。

2 技术要点：注浆孔径向布置，重点加固拱顶、边墙等关键部位，注浆深度一般为 3.0m~8.0m。

6.2.3 局部补强注浆

1 适用条件：小范围松散体、岩溶空洞或支护背后脱空区。

2 技术要点：采用浅孔低压注浆，注浆压力一般控制在 0.5MPa~1.0MPa，以充填为主。

6.2.4 注浆材料类型

应以水泥基浆液为主，必要时可采用化学浆液或复合浆液。水泥基浆液适用于大多数裂隙岩体；化学浆液或复合浆液用于微细裂隙或动水条件，化学浆液需控制环保指标。

1 水泥基浆液：应作为首选材料，宜采用强度等级不低于 42.5 级的普通硅酸盐水泥或超细水泥。水灰比应根据地质条件、强度要求、抗渗需求和注浆压力确定。当围岩裂隙细微或需快速止水时，可选用超细水泥（比表面积 $\geq 800 \text{ m}^2/\text{kg}$ ）。

2 化学浆液：仅用于水泥浆液难以渗透的极细裂隙或特殊补强部位，如环氧树脂、聚氨酯或水玻璃类材料。化学浆液的使用应严格控制其环保指标，并符合《建设工程化学灌浆材料应用技术标准》GB/T 51320-2018。

3 复合浆液：为提高性能，可在水泥浆液中添加外加剂，如聚合物（如聚丙烯酸酯）：掺量宜为水泥质量的 2%~15%、早强剂（如氯化钙，掺量 1%~5%）、减水剂（如萘系，

掺量 0.5%~5%)、膨胀剂(如 UEA, 掺量 6%~8%)等,以调整初凝时间、改善流动性和增强体积稳定性。

6.3 注浆参数设计

6.3.1 注浆压力

注浆压力的确定应遵循“克服地应力阻抗、有效充填裂隙”的原则。设计压力需通过现场高压压水试验和地应力测试综合确定,具体规定如下:

1 初始压力(起始注浆压力)

确定原则:初始压力必须同时克服裂隙水压力(P_w)和裂隙闭合法向应力(即地层阻力)。在无实测数据时,地层阻力可近似取围岩最小主应力(σ_3)的 60%~80%。

建议范围:建议初始压力 P_{start} 取值范围为: $P_{start} \geq \max(1.5 P_w, 0.6 \sigma_3)$,且一般不宜低于 3.0 MPa(针对深埋高地应力区)。

说明:高地应力下围岩裂隙闭合紧密,若初始压力过低,浆液无法开启裂隙通道,导致“注不进”现象。

2 最大允许压力(P_{max}):最大允许压力是注浆系统的压力上限,由围岩的允许变形量和致裂强度控制,用于设定注浆泵安全阀的卸压值。

确定原则: P_{max} 应低于围岩的致裂压力(除非设计明确采用劈裂注浆工艺)。在高地应力软弱围岩中,为防止有害的水力劈裂导致围岩结构破坏或跑浆,建议 P_{max} 不超过围岩最小主应力(σ_3)的 1.0~1.1 倍。

控制措施:注浆泵及管路系统必须安装安全卸压阀,其开启压力应设定为 P_{max} 。当系统压力超过此值时,必须立即停止注浆或自动卸压。

3 终压(结束注浆压力):

确定原则:终压应参考围岩最小主应力及岩体劈裂强度确定。

渗透/充填注浆:终压宜控制在最小主应力的 80%~90% ($P_{end} \approx 0.8\sim 0.9 \sigma_3$),以防止过度劈裂破坏围岩完整性。

压密/劈裂注浆：在极软弱或无裂隙地层需造浆脉时，终压可略高于最小主应力，但不宜超过最小主应力的 1.2~1.5 倍（ $P_{end} \leq 1.2 \sim 1.5 \sigma_3$ ），且需严控注浆量。

4 压力控制原则：采用“分级升压、控压限流”方式。注浆过程中应实时监测压力-流量（P-Q）曲线，当压力超过最小主应力（ σ_3 ）时，应特别关注围岩变形监测数据，防止发生有害的地层致裂。

6.3.2 浆液扩散半径

1 浆液扩散模型：鉴于高地应力下岩体渗透性具有显著的各向异性，传统的球形扩散模型不适用，应采用考虑地应力方向与裂隙优势面的各向异性扩散模型（如椭球体扩散模型）。

优势扩散方向（长轴）：通常平行于最大主应力方向或岩体主要构造裂隙的走向。

受阻扩散方向（短轴）：通常平行于最小主应力方向，裂隙在高压下闭合，渗透性低。

2 理论估算公式：浆液扩散半径不再是单一数值，而是分为优势方向半径（ R_{max} ）和垂直方向半径（ R_{min} ），可按修正后的公式估算：

$$R_{max} = \lambda_1 \cdot R_0$$

$$R_{min} = \lambda_2 \cdot R_0$$

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3kPt}{n\mu}}$$

式中： R_0 为等效理论扩散半径（m），基于球形扩散理论计算； k 为岩体平均渗透系数（m/s）； P 为注浆压力（Pa）； t 为注浆时间（s）； n 为围岩裂隙率或孔隙率； μ 为浆液粘度（Pa·s）； λ_1 为优势方向扩散系数，通常 $\lambda_1 > 1.0$ （取值建议 1.2~1.5）； λ_2 为受阻方向扩散系数，通常 $\lambda_2 < 1.0$ （取值建议 0.6~0.8）。

3 参数确定与布孔修正：

系数确定： λ_1 和 λ_2 应通过现场注浆试验，结合压水试验的各向异性渗透率比值确定。

布孔设计：注浆孔布置应根据计算出的 R_{max} 和 R_{min} 进行非等间距调整。在扩散困难的方向（短轴方向）应适当加密孔距，在扩散容易的方向（长轴方向）可适当增大孔距，以形成连续均匀的加固圈。

6.3.3 注浆孔布置

- 1 布孔模式：宜采用梅花形或环形布置。
- 2 孔间距与排距：孔间距宜为扩散半径的 1.5 倍~1.6 倍，排距为 1.2 倍~1.5 倍。
- 3 孔深：应穿透破碎带并进入稳定岩层 1.0m~2.0m。
- 4 注浆方式：宜采用前进式或后退式分段注浆，实现对不同深度裂隙的精准灌注。

6.3.4 注浆结束标准

- 1 采用“定量-定压”双控原则：达到设计终压并稳定 10min~15min；进浆率小于 1L/min~2L/min。
- 2 单孔注浆量达到设计值的 80% 以上时可视为满足要求。

6.4 注浆材料

6.4.1 注浆材料选用原则

应以水泥基浆液为主，必要时可采用化学浆液。水泥基浆液适用于大多数裂隙岩体；化学浆液用于微细裂隙或极端动水条件，但需控制环保指标。

1 水泥基浆液：应作为首选材料，宜采用强度等级不低于 42.5 级的普通硅酸盐水泥或超细水泥（比表面积 $\geq 800\text{m}^2/\text{kg}$ ）。水灰比根据地质条件、强度要求、抗渗需求和注浆压力确定。必要时可在水泥浆液中添加外加剂，如聚合物、早强剂、减水剂、膨胀剂等，以调整初凝时间、改善流动性和增强体积稳定性。

2 化学浆液：仅用于水泥基浆液难以渗透的极细裂隙或特殊补强部位，如环氧树脂、聚氨酯（发泡率 ≤ 5 倍）或水玻璃类材料模数宜为 2.4~3.0，波美度 $30^\circ\text{Be}'\sim 40^\circ\text{Be}'$ 。化学浆液的使用应严格控制其环保指标，并符合《建设工程化学灌浆材料应用技术标准》GB/T 51320-2018。

6.4.2 注浆材料性能要求

注浆材料的性能应通过室内试验验证，确保其满足工程需求。主要控制指标包括：

1 粘度：水泥基浆液粘度宜 $\leq 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，化学浆液宜 $\leq 10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

2 初凝时间：水泥基浆液初凝时间宜为 30~150 min，化学浆液宜为 5~30 min。

3 析水率：水泥基浆液析水率应 $\leq 5\%$ ，以保证浆液稳定性和减少收缩。

4 早期强度（Early Strength）：为满足注浆后快速开挖的需求，水泥基浆液结石体 24 h 抗压强度不应低于 2.0 MPa；对于需要紧急抢险或极短时间内开挖的工况，应通过添加早强剂或使用特种水泥，使 8h 抗压强度不低于 3.0 MPa。

5 最终强度（Final Strength）：浆液结石体固结 28d 无侧限抗压强度，普通水泥浆液不应低于 5 MPa，化学浆液不应低于 10 MPa。

6 耐久性：结石体应具有抗渗性和抗化学腐蚀性，渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ （水泥基浆液）或 $\leq 1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ （化学浆液）。

7 分级标准：根据工程紧迫程度和围岩稳定性要求，注浆材料强度指标宜按表 6.1 选取。

表 6.1 注浆结石体时效强度推荐指标

应用场景	适用工况描述	早期强度要求	最终强度要求 (28d)
I类：常规预加固	围岩软弱但流变性不强，允许一定的养护等待时间	24 h 强度 $\geq 2.0 \text{ MPa}$	$\geq 5.0 \text{ MPa}$
II类：快速开挖	高地应力显著，需在注浆后尽快开挖以释放应力	12 h 强度 $\geq 3.0 \text{ MPa}$ ； 24 h 强度 $\geq 5.0 \text{ MPa}$	$\geq 8.0 \text{ MPa}$
III类：紧急抢险	发生突水、塌方或剧烈变形，需立即止水固结	1 h 强度 $\geq 0.5 \text{ MPa}$ ； 8 h 强度 $\geq 3.0 \text{ MPa}$	$\geq 10.0 \text{ MPa}$ (宜选双液浆/化学浆)

注：表中强度值为纯浆液结石体无侧限抗压强度；对于高地应力极软岩，当采用水泥-水玻璃双液浆时，应重点考核其凝胶时间与 30min 强度。

6.4.3 注浆材料配比设计

浆液配比应通过系统的室内试验确定，并根据地质条件、强度要求、抗渗需求、注浆压力和施工工艺调整。

1 一般规定：浆液配比应通过室内试验与现场注浆试验相结合的方式确定。设计应根据地应力水平、围岩破碎特性及地下水发育程度，按照表 6.2 选择适宜的浆液类型与基础配比。

2 典型工况下的材料选型与配比推荐：针对高地应力软弱破碎围岩的典型组合特征，注浆材料选型应符合表 6.2 的规定：

表 6.2 高地应力隧道围岩注浆材料选型与配比推荐表

围岩组合特征	典型地质描述	推荐浆液类型	建议水灰比 (W/C)	关键外加剂/改性建议
I类：高应力 + 微裂隙	岩体受挤压紧密，裂隙张开度小 (<0.2mm)，呈压密状	超细水泥浆液 或 改性环氧树脂	1.0:1~2.0:1 (稀浆渗透)	高效减水剂 (0.5%~1.0%)
II类：高应力 + 破碎松散	岩体破碎呈碎石状、角砾状，空隙率大，易塌孔	普通硅酸盐水泥浆 (P.O 42.5+)	0.6:1 ~ 0.8:1 (浓浆压密)	膨胀剂 (UEA) (6%~8%)
III类：高应力 + 泥化夹层	含大量粘土矿物，遇水易软化、膨胀	水泥-聚合物复合浆液	0.8:1 ~ 1.0:1	聚合物乳液 (2%~5%)；提高粘结强度和抗渗性
IV类：动水 + 破碎带	地下水发育，存在涌水或渗流冲刷风险	水泥-水玻璃双液浆 (C-S)	W/C 0.8:1 ~ 1:1 体积比 C:S = 1:0.5 ~ 1:1	速凝剂 (3%~5%) 控制凝胶时间在 30s~120s

3 动态调整原则

渗透注浆（针对 I、III 类）：宜采用较高的水灰比（1.0~2.0）起始，利用低粘度浆液优先充填微细裂隙；随后逐级降低水灰比至 0.8~1.0，提高结石体强度。

压密/劈裂注浆（针对 II 类）：宜采用低水灰比（0.5~0.8）的浓浆，利用高注浆压力强行挤密松散岩体，形成高强度的浆脉骨架。

高地应力修正：在极高地应力区（强度应力比 < 4），为防止浆液被地应力“挤出”或无法凝固，应适当增加早强剂掺量，确保浆液在 4~8 小时内达到初撑强度。

4 外加剂掺量标准

为改善浆液性能，可根据试验结果添加外加剂，常用掺量范围（按水泥质量百分比计）如下：

聚合物（如聚丙烯酸酯）：2%～5%，用于提高粘结力和韧性；

早强剂（如氯化钙/三乙醇胺）：1%～3%，用于缩短凝结时间，满足快挖要求；

减水剂（如聚羧酸/萘系）：0.5%～1.0%，用于降低水灰比并保持流动性；

膨胀剂（如 UEA/微膨胀剂）：6%～10%，用于防止浆液固结收缩脱空。

6.4.4 注浆材料检验与储存

1 注浆材料进场应具有合格证和出厂检验报告，并按批抽样复验。

2 水泥储存时间不超过 3 个月，超细水泥不超过 1 个月；化学浆液应密封避光保存。

注浆材料的具体性能指标可参照本规程附录 A 执行。施工中应做好材料记录，确保可追溯性。

7 注浆设备

7.1 一般规定

7.1.1 高地应力隧道软弱破碎围岩超前注浆施工设备，应满足高可靠性、高精度、高效率及强适应性的要求，确保在复杂地质条件下能够安全、连续、稳定地完成钻孔与注浆作业。

7.1.2 施工设备应根据注浆设计进行选型和配套，形成完整的钻孔、制浆、注浆及监测系统。

7.1.3 高地应力隧道软弱破碎围岩超前注浆施工设备应由钻孔系统、制浆与储浆系统、注浆系统、监测与控制系统和安全防护系统组成，各系统应包括下列组成：

- 1 钻孔系统应由钻机、随钻测斜装置、钻头和钻杆组成；
- 2 制浆与储浆系统应由制浆机和储浆搅拌桶组成；
- 3 注浆设备应由注浆泵、注浆管路和密封装置组成；
- 4 监测与控制系统应由数据采集装置、分析显示终端及自动化监测仪器组成；
- 5 安全防护系统应由机械防护、应急装置及个人防护装备组成。

7.1.4 所有设备进场前应进行全面的检查、调试与试运行，确保其性能指标、计量精度和安全装置符合施工要求，对注浆泵、钻机等关键设备，应备有充足的易损件。

7.1.5 施工设备应定期维护、保养并对相关计量装置进行校验。

7.2 钻孔系统

7.2.1 钻机应选用大扭矩、高给进力的全液压履带式钻机或专用锚固钻机，动力头行程不宜小于 2 米，仰俯角度范围应能满足隧道轮廓周边所有设计孔位的钻孔需求。

7.2.2 钻机应配备实时随钻测斜装置，具备数据存储和输出功能，可在操作面板实时显示钻孔轨迹，发现偏斜超限能及时报警，防止高压应力下孔道偏斜。

7.2.3 钻头应根据岩层情况选用：

- 1 极软弱、松散破碎层应采用硬质合金肋骨钻头或钢齿三牙轮钻头；

2 软弱-中硬破碎层应采用球齿钻头（钮扣钻头）或金刚石钻头；

3 节理发育、软硬不均、存在硬质夹层的地层应采用混合型钻头（球齿+金刚石）或高韧性球齿钻头；

4 需跟管钻进的极破碎、流塑状地层应采用偏心/同心跟管钻头。

7.2.4 钻杆选择应与钻头配合，宜采用外平式、高强度（如R780级以上）地质钻杆。在软弱破碎地层优先选用宽叶片、大螺距的螺旋钻杆，以利于排渣。钻杆接头强度应与钻杆本体等强。

7.2.5 施工现场应配备多种类型的钻头，根据地层变化和实际钻进效果（如速度、返渣情况、钻杆跳动等）及时更换调整。

7.2.6 针对高地应力软弱破碎围岩易发生钻孔缩径、孔壁流变、挤压塌孔等特性，施工现场必须配备跟管钻进系统（如偏心跟管钻具、同心跟管钻具）或套管护壁装置。

1 跟管钻具的外径应略大于套管外径，确保能够同步带动套管跟进。

2 套管应具备足够的强度和刚度，能抵抗高地应力引起的侧向挤压力，确保注浆通道不被压扁或闭合。

7.3 制浆与储浆系统

7.3.1 应选用高速制浆机，容量与效率应与注浆泵最大排量匹配，搅拌转速不应低于 800 r/min，且搅拌转速可调整。

7.3.2 宜配备低速搅拌储浆桶，容量应不小于单孔最大设计注浆量的 2.0 倍，并设有液位计。

7.4 注浆系统

7.4.1 注浆泵应根据浆液的材料组成和流动性进行选型：

1 纯水泥浆液、水泥基混合浆液应选用多缸柱塞式注浆泵；

2 化学浆液应选用液压隔膜计量泵或精密齿轮计量泵；

3 双液浆应选用液压驱动双液注浆泵。

7.4.2 注浆泵额定工作压力不应低于 5 MPa，应具备压力与流量无级调节功能。

7.4.3 注浆管路应使用额定压力不低于 10 MPa 的高压钢丝缠绕橡胶软管。

7.4.4 孔口管应为高强度无缝钢管。

7.4.5 所有接头应使用专用高压接头或法兰盘连接，不应使用普通水管接头。

7.4.6 分段注浆时，应采用机械式或液压式孔内止浆塞，其止浆效果应可靠，并能承受最大设计注浆压力。

7.4.7 所有注浆管路及连接件的额定压力应与注浆泵匹配，整个注浆系统的承压能力必须大于最大设计注浆压力的 1.5 倍。

7.5 监测与控制系统

7.5.1 注浆泵应集成或外接高精度压力传感器（精度 $\pm 0.5\%$ FS）和电磁流量计或质量流量计（精度 $\pm 1\%$ FS）。

7.5.2 压力传感器量程应为最大设计注浆压力的 1.5~2.0 倍，应在压力表与主管路之间安装压力表隔膜阀或环形充水（油）缓冲装置。

7.5.3 应配备注浆自动记录仪，实时绘制并存储压力-流量-时间（P-Q-t）曲线。

7.5.4 注浆泵及主管路上应安装卸压安全阀，设定压力不应超过系统最高允许压力。

7.5.5 应配备自动化全站仪（测量机器人），注浆作业期间对隧道拱顶沉降和周边收敛进行不间断的自动化监测。

7.5.6 在关键部位注浆圈内外侧应安装钻孔应变传感器，注浆过程中围岩应力-应变场变化应实时监测。

7.5.7 宜引入智能检测和监测手段，如采用随钻监测（MWD）技术实时获取钻进参数以反演围岩参数；在重要区段宜布设分布式光纤变形监测系统，实时捕捉注浆过程中的微小变形与脱空情况。

7.6 安全防护系统

7.6.1 注浆泵及主管路上必须安装机械式卸压安全阀，设定压力不得超过系统最高允许压力，并定期校验。

7.6.2 高压注浆管路连接端及孔口管处应安装防护罩，防止接头失效崩脱伤人。

7.6.3 对于高地应力条件下可能发生的岩爆或突水，钻孔系统应配备孔口防突装置（如防突钻杆夹持器、防喷阀等）。

8 施工工艺

8.1 一般规定

8.1.1 注浆施工前应具备下列资料：

- 1 隧道工程地质勘察报告；
- 2 超前地质预报成果报告；
- 3 隧道施工图设计文件及图纸；
- 4 专项高地应力测试与分析报告；
- 5 专项注浆设计文件及图纸；
- 6 施工现场监控量测数据；
- 7 条件验收文件，包括开挖作业面条件验收记录和机械设备报验记录。

8.1.2 施工前，应依据地应力测量结果、地质勘察报告及超前地质预报成果，将围岩划分为以下典型类型，编制详细的专项施工方案，指导差异化施工：

- 1 极软弱、松散破碎层；
- 2 软弱-中硬破碎层；
- 3 节理发育、软硬不均、存在硬质夹层的地层；
- 4 极破碎、流塑状地层。

8.1.3 高地应力隧道软弱破碎围岩超前注浆施工，应遵循“动态调整、信息化施工、严控过程、强化监测”的原则，根据钻孔揭示的地质条件、注浆过程参数($P-Q-t$ 曲线)及围岩变形监测反馈，及时优化调整注浆参数与工艺。

8.1.4 高地应力隧道软弱破碎围岩超前注浆施工，应按照图 8.1 的施工流程进行：

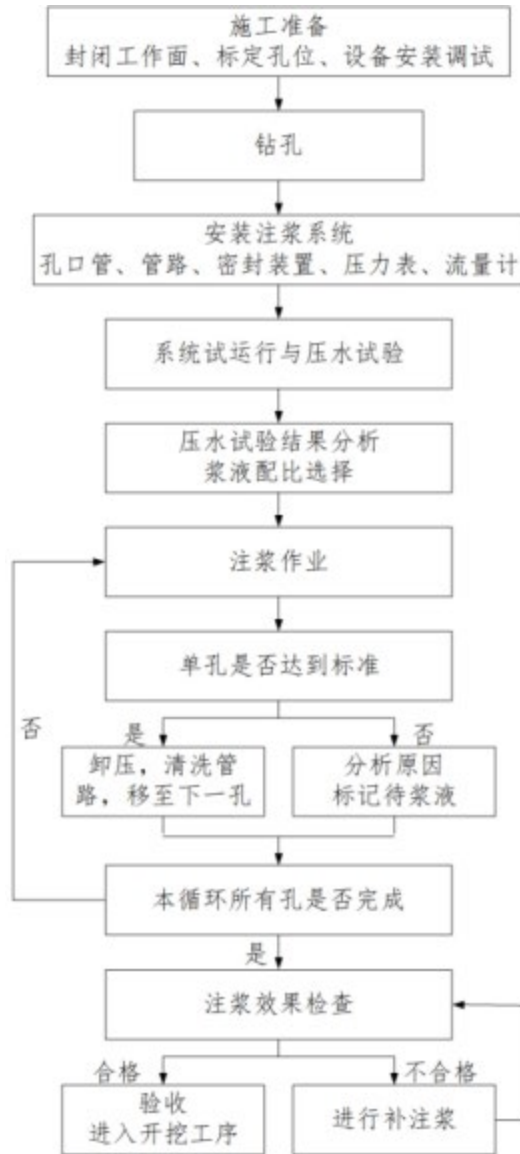


图 8.1 高地应力隧道软弱破碎围岩超前注浆施工流程图

8.2 施工准备

8.2.1 开挖工作面应按要求进行初喷混凝土封闭，封闭厚度不小于 50 mm，强度不低于 C20，封闭范围应包括注浆作业区及相邻至少 3 m 的隧道周边。

8.2.2 应按设计图纸精确标定每个注浆孔的孔位与方向，所有孔位应编号，并用红油漆清晰标识，孔口位置偏差应不大于 ± 50 mm。

8.2.3 钻机、注浆泵、制浆与储浆系统等设备应运输至指定位置并稳固安装，连接风水管路及注浆管路，进行空载试运行，确保设备状态正常。

8.3 钻孔

8.3.1 应按设计孔位、角度、深度钻孔，开孔时轻压慢转，确保钻机稳固、导向准确。

8.3.2 钻孔至设计深度后，反复扫孔，清除孔内岩粉。

8.3.3 钻进控制参数：

1 初始阶段钻进压力宜采用低钻压（ <5 MPa），进入正常岩层后可提高至 5~15 MPa；

2 软弱破碎带钻速宜控制在 100~300 rpm，较完整岩层可提高至 300~600 rpm；

3 在破碎带钻进速度宜放缓至 0.2~0.5 m/min，防止卡钻；

4 每钻进 3~5 m 应采用测斜仪检查钻孔轨迹，发现偏斜超过允许值（1%）应及时纠正，必要时回填重钻，外插角允许偏差 $\pm 1^\circ$ ，孔深允许偏差 ± 50 mm。

8.3.4 钻进过程中应详细记录钻速、压力变化、岩粉颜色与性状、卡钻、异响等情况，作为判断围岩应力状态和完整性的依据。

8.3.5 卡钻时应首先反向回转，采用高压风与水交替冲洗；若无效，可尝试小幅度推进与回撤；15 min 内无法解卡，应后退钻杆至安全位置，进行注浆固结后，绕过该点重新开孔。

8.3.6 对于有岩爆或大变形倾向的极高应力区段，可遵循“先释后固”的原则，在注浆孔之间或特定位置钻设应力释放孔，释放部分能量后，再进行系统性注浆加固。

8.4 安装

8.4.1 孔口管安装：

1 孔口位置用钻机扩孔或开挖小导坑，孔径宜比孔口管直径大 10~20 mm，孔深 1.5~2.0 m；

2 埋设孔口管，通过法兰盘与注浆管路连接；

3 孔口管外露长度宜为 15~20 cm，方便安装密封装置和管路。

8.4.2 注浆管路安装：

1 注浆管路应通过专用高压接头或法兰盘与孔口管连接，并配备密封圈；

- 2 管路布置应平顺，避免出现急弯、死弯；
- 3 双液注浆时，两条管路应对称布置、长度一致，在混合前避免交叉缠绕。

8.4.3 密封装置安装：

- 1 孔口管密封，应向管壁与孔壁间隙注入早强水泥砂浆或高强锚固剂进行封堵，应达到 5 MPa 抗压强度后，开始注浆；
- 2 对于极软弱、破碎地层，采用法兰盘连接时应采用膨胀螺栓将法兰盘紧压在初喷混凝土面上。

8.4.4 压力表与流量计安装：

- 1 压力表应安装在注浆孔口、注浆泵出口处；
- 2 压力表与主管路之间应安装压力表隔膜阀或环形充水（油）缓冲装置；
- 3 流量计应安装在注浆泵出口主管路上，且前后需有足够的直管段（宜为前 10D 后 5D，D 为管径）。

8.4.5 在正式注浆前，应进行系统试运行：

- 1 关闭孔口阀门，启动注浆泵，向管路内注入清水，缓慢加压至最大设计注浆压力的 1.2 倍，保压 15 分钟，观察压力降和所有连接处、密封处，无渗漏、无压降为合格；
- 2 试压过程中，核对泵出口压力表与孔口压力表的读数差异，检查流量计读数是否与泵的排量匹配；
- 3 开启整个系统进行清水循环，检查管路是否通畅。

8.5 压水试验

8.5.1 压水试验压力应分级施加，每级压力稳定 5 min，分别为 0.3P 终、0.5P 终、0.8P 终（P 终为设计注浆终压）。

8.5.2 记录最后一级压力下的稳定流量 Q (L/min)，计算吕荣值 (Lu)。标准吕荣值定义为在 1 MPa 压力下，每米试段每分钟注入的水量 (L)。当试验压力不为 1 MPa 时，可按公式换算：

$$q=Q/(P_f \times L)$$

式中：

q —透水率（Lu）；

Q —最后一级压力下的稳定流量（L/min）；

P_f —最后一级施加压力（MPa）；

L —试验段长（m）。

注：在高压压水试验中，若水流状态超出层流范围（层流假设失效），应对计算结果进行相应的流态修正。

8.5.3 压水试验获得的吕荣值和 P - Q 曲线，应作为确定注浆起始浓度、压力和判断注浆效果的重要依据。对于 q 值大（>10 Lu）的孔段，应提前准备浓浆、间歇注浆或掺加外加剂的方案。

8.6 浆液制备

8.6.1 施工前应对不同水灰比、不同掺合料和不同外加剂的浆液进行下列项目的试验：

- 1 浆液配制程序及拌制时间；
- 2 浆液的凝结时间，包括初凝和终凝时间；
- 3 浆液流动性或流变参数；
- 4 浆液流动性或流变参数；
- 5 浆液的沉淀稳定性；
- 6 浆液结石体的强度和弹性模量。

8.6.2 制浆材料应准确计量，水泥、早强剂、减水剂等固相材料应采用重量称量法，水和化学浆液等液相材料宜用体积称量法，称量误差不应大于1%。

8.6.3 制备纯水泥浆液时，制备工艺应符合下列要求：

- 1 搅拌时间不应少于3 min，确保浆液均匀；

- 2 宜先向搅拌桶中加入规定比例的用水量，在搅拌状态下缓慢、均匀地加入水泥；
- 3 搅拌好的浆液应经过筛网（孔径不宜大于 1.0 mm）过滤，以除去结块和杂质；
- 4 制备好的浆液在注入前应存放在低速搅拌的储浆桶中，并持续搅拌以维持其均匀性，防止沉淀。

8.6.4 制备化学类浆液时，制备工艺应符合下列要求：

- 1 必须严格按照试验确定配比，进行精确计量；
- 2 操作人员应佩戴必要的防护用品（如手套、护目镜、口罩），现场应通风良好。

8.6.5 制备复合浆液时，制备工艺应符合下列要求：

- 1 应遵循试验确定的投料顺序，一般宜先将水、减水剂等液态外加剂混合均匀，再加入水泥，粉状外加剂宜与水泥预先干拌均匀；
- 2 加入外加剂后，应适当延长搅拌时间，确保外加剂在浆液中完全分散、混合均匀。

8.6.6 对于双液注浆材料，若需预先混合，应采用低速机械搅拌，避免因剧烈搅拌而卷入过多空气。

8.7 注浆作业

8.7.1 注浆顺序应遵循“先下后上、先外后内、间隔跳孔”的原则。

8.7.2 初始阶段采用较低压力和流量注浆，防止对软弱破碎围岩造成劈裂，扰动围岩，并控制浆液过远扩散，地层开始吸浆后，逐步升高至设计压力。

8.7.3 正常注浆阶段采用设计压力恒压注浆，注浆过程应实行信息化施工，实时监控和分析注浆压力（ P ）、注浆流量（ Q ）与时间（ t ）的关系，实时判断地层情况并做出调整，应对策略见表 8.1。

表 8.1 注浆过程 P - Q - t 曲线分析与应对措施

P - Q - t 曲线特征	情况判断	推荐应对措施
----------------------	------	--------

P 持续平稳, Q 均匀减小	理想状态, 浆液在裂隙内均匀充填、扩散	保持当前浆液配比, 继续注浆至结束
P 缓慢持续上升, Q 同步增大或保持高位	围岩致密, 浆液扩散受阻, 可能伴随围岩变形	1. 密切关注工作面及周边收敛情况 2. 适当降低注浆压力, 采用低弹模、缓凝浆液 3. 若变形持续加剧, 应暂停注浆, 评估安全状态
P 长时间不上升, Q 基本不变或增大	存在大空洞、大裂隙或通道, 浆液大量流失	1. 改用浓浆 ($W:C=0.6:1$) 2. 采用间歇注浆, 待先期浆液初凝后再注
P 陡然骤升, Q 急剧下降至零	管路或孔内裂隙被堵塞	1. 立即停泵, 检查管路 2. 若为孔内堵塞, 可改用稀浆或清水进行脉冲式压通, 若无效, 应提前结束本段注浆
P 出现波动, Q 随之波动	浆液在软硬不均地层中发生“劈裂-填充”的交替过程	适当降低注浆速度, 维持压力在合理波动范围内

8.7.4 根据地层条件, 可采用分段前进式或分段后退式注浆:

- 1 前进式注浆适用于极软弱、破碎、成孔困难的地层;
- 2 后退式注浆适用于成孔性较好的地层, 一次钻到设计深度, 由孔底向孔口分段注浆;
- 3 分段注浆每段注浆长度宜短, 一般 3~5m;
- 4 分段注浆应安装止浆塞, 下放至设计深度后, 通过液压或机械方式胀开橡胶套, 与孔壁紧密贴合。

8.7.5 极端破碎地层注浆时应在钻孔内安装带环状注浆孔的袖阀管, 管外与孔壁间注入套筒料, 注浆时用双塞式止浆器在指定位置胀开, 顶破套筒料进行注浆。

8.7.6 异常情况处理:

- 1 若发生串浆, 应立即将串浆孔堵塞, 待注浆孔注浆结束后, 再对串浆孔进行扫孔和注浆;
- 2 若浆液从工作面大量漏出, 可采用低压、浓浆、间歇注浆, 或掺加速凝剂、填充惰性材料等方法处理;

3 压力骤升或吸浆量骤降应立即检查是否管路堵塞，可改用清水冲洗，查明原因后再行注浆。

4 对于吸浆量小、压力上升快的孔段，可尝试采用劈裂注浆工艺，短时间内适当提高压力（需经设计同意）以开启裂隙，然后恢复至正常压力注浆。

8.7.7 满足下列条件之一结束单孔注浆：

1 注浆压力达到设计终压，且吸浆量小于 1~2 L/min，并稳定 10~15 min；

2 注浆量已达到设计值的 1.5~2.0 倍，且压力无明显上升；

3 围岩表面发生明显变形或浆液从其他孔、裂隙中大量溢出；

4 注浆过程中，围岩收敛或拱顶沉降速率超过设计允许值，应立即暂停注浆，分析原因并采取安全措施后，方可决定是否继续注浆或调整结束标准。

8.7.8 单孔注浆结束后，应先打开卸压阀，待压力表归零后再拆卸管路。

8.7.9 单孔注浆结束，应用清水或稀碱性水将注浆泵、管路及搅拌桶彻底清洗干净，防止浆液凝固堵塞设备。

8.8 移孔

8.8.1 当前一注浆孔达到结束标准后，可移至下一孔位施工。

8.8.2 移孔前，应记录该孔的最终注浆量、压力等数据。

8.8.3 对于未达到结束标准的孔，应做好标记，分析原因，并在本循环注浆结束后进行补孔注浆。

8.9 效果检查与补注浆

8.9.1 一个注浆循环结束后，应采用检查孔取芯、压水试验或物探（如地质雷达、地震波法）等方法进行注浆效果检查。

8.9.2 检查孔应布置在浆液扩散薄弱区、注浆异常区或地质复杂区，数量不少于注浆孔总数的 3%~5%。

8.9.3 检查孔取芯率应大于 75%，观察浆液充填情况，并对岩芯进行强度测试。检查孔压水试验的吕荣值应达到设计规定的合格标准。

8.9.4 若效果检查未达到设计要求，应分析原因，进行补注浆。补注浆可针对检查孔或新增补注浆孔进行，直至效果检查合格。

8.9.5 效果检查与评价报告应作为开挖条件验收的重要依据。

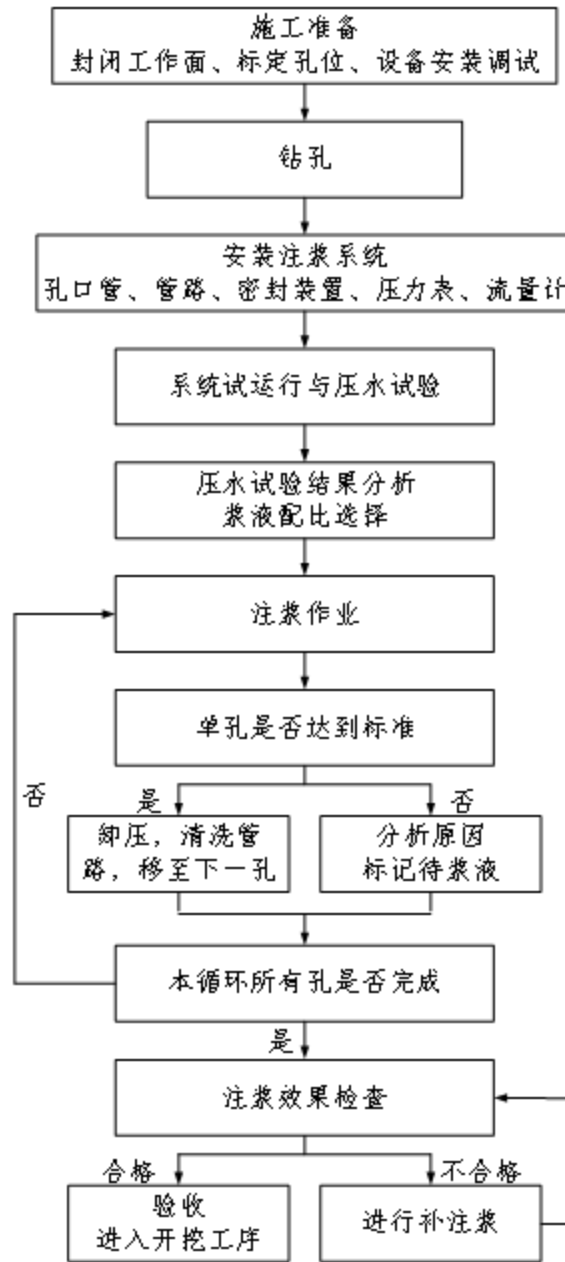


图 8.2 注浆效果检查与补注浆流程图

9 施工质量检查与评估方法

9.1 一般规定

9.1.1 高地应力隧道软弱破碎围岩的超前注浆质量检查与评估，应遵循“过程检查与最终检验相结合、局部检测与整体评估相结合”的原则。

9.1.2 质量评估应基于完整的施工记录、系统的现场检验数据和相关的分析报告进行综合判定，核心是验证注浆体能否与围岩共同形成有效的承载结构，控制围岩变形。

9.1.3 质量检查工作应在注浆施工结束后，根据浆液结石体的设计强度要求，在规定的养护龄期（通常水泥基浆液为 7~14d，化学浆液为 3d 或按设计要求）后进行。对于需要即时评估稳定性的工程，可在达到早期强度后进行检查。

9.2 检查与评估方法

9.2.1 分析法

分析法是对施工过程的复核与诊断，是质量评估的基础。

1 核对注浆参数记录：全面审查注浆施工记录，重点分析：各注浆孔的注浆压力与注入率（L/min）的变化关系，判断其是否符合设计预期的渗透、劈裂或压密模式。

总注浆量：是否达到设计预估量，并分析注浆量在空间分布上的均匀性与合理性。

注浆结束标准：是否达到设计规定的终压和稳定时间。

2 成果分析：通过分析注浆参数，可初步判断浆液的扩散范围、地层的可注性以及注浆过程的正常与否，为钻探检验点的布置提供依据。

9.2.2 物探法

物探法是一种快速、连续的间接检测方法，用于评价注浆区域的整体性与均匀性。

1 跨孔声波波速测试：在注浆区域两侧钻孔，测试注浆前后弹性波在岩土体中的传播速度。通过波速提高率和波速云图，可直观展示注浆加固范围的整体效果，评价岩土体整体性的改善程度。

2 孔内电视或光学成像：在检查孔内直接观察岩体裂隙、土层孔隙中浆液结石体的充填状况、厚度、密实度及与周围岩土体的结合情况。

3 电阻率法/电磁波 CT：通过测量注浆前后地层电阻率的变化（因浆液充填导致孔隙水性质改变，从而影响电阻率），来圈定浆液扩散范围和评估注浆均匀性。此法在富水地层中效果显著。

9.2.3 钻探法

钻探法是最直接、最可靠的检验方法，为质量验收提供决定性依据。

1 取芯检查：

对检查孔进行全程取芯，观察并描述岩芯中浆液结石体的赋存状态（呈脉状、网状或孔隙充填状）、充填率。

现场通过指甲或小刀刻划初步判断结石体强度，并评价其与破碎岩块的胶结情况。

对取出的完整浆液结石体或浆-岩复合体芯样，应在实验室内加工成标准试件，进行无侧限抗压强度试验，其强度值应满足设计要求。鉴于高地应力环境，亦可辅以点荷载试验快速获取强度参考值。

2 压水（注水）试验：

在检查孔的特定段落（通常是地质条件较差或注浆量异常的部位）进行压水试验。

试验方法宜采用吕荣（Lu）试验法。通过测定规定压力下，单位试段长度、单位时间内的耗水量，计算地层的透水率。

合格标准：检查孔各试段压水试验的透水率值应小于设计规定值。设计无明确规定时，对于以加固和控制涌水为目的的隧道工程，可参照不大于 3~5 Lu 的标准。

3 开挖面直接观察与验证：

此方法是钻探法在开挖阶段的延伸与应用，是最终效果的检验。

记录开挖后围岩的节理裂隙面浆脉充填率、岩体成块性的改善程度、涌水量的变化以及开挖面的自稳时间。

9.3 检查点布置与数量

9.3.1 检查孔（点）的布置应遵循重点性、代表性、针对性的原则，重点布置在：地质条件复杂、注浆量异常（过大或过小）的区域；注浆过程中发生过压力骤降、串浆、冒浆等异常情况的部位；物探检测结果存在异常的区域；隧道拱部、边墙等关键受力部位。

9.3.2 检验孔的数量不应少于注浆孔总数的 3%~5%，且每个循环或工程单元不应少于 2 个。

9.3.3 当工程规模较大、地质条件极为复杂或检查结果不满足要求时，应适当增加检验比例。

9.4 验收合格标准

9.4.1 过程控制合格：注浆施工记录完整、真实。注浆压力、注浆量等关键参数符合设计和施工方案要求，未出现不可控的浆液流失或击穿现象，且达到设计规定的结束标准。

9.4.2 直观效果合格：

1 钻探取芯：检查孔岩芯中浆液结石体呈网状或脉状有效充填裂隙，胶结良好，取芯率与结石体分布满足设计要求。

2 开挖面观察：开挖后，掌子面自稳时间显著提高，围岩成块性好，无明显坍塌、滑移。裂隙面充填饱满，涌水量小于设计控制值。

9.4.3 物理力学指标合格：

1 防渗性能：检查孔压水试验的透水率平均值不大于设计允许值，且单点最大值不超过设计允许值的 1.5 倍。对于以控制涌水为目的的工程，开挖后的实际涌水量应作为最终验收依据。

2 加固性能：室内试验测得的结石体或浆-岩复合体无侧限抗压强度达到设计值。或通过点荷载试验、回弹测试等原位手段验证其强度满足要求。

9.4.4 整体稳定性合格：

1 物探验证：物探检测结果显示，注浆区域整体性、均匀性显著提高，无明显薄弱区。

2 变形控制（核心指标）：隧道开挖通过该注浆区段后，周边收敛位移量及变形速率必须小于设计控制值，并趋于稳定。支护结构应力应在设计允许范围内。

9.5 不合格处理

9.5.1 若“过程控制”或“直观效果”不合格，应立即分析原因，并在相应区域进行补充注浆。补充注浆的方案（如调整浆液配比、压力、孔位等）应经设计确认。

9.5.2 若“物理力学指标”或“整体稳定性”不合格，应：

1 扩大检验范围，采用物探和钻探相结合的方法，进一步查明不合格区域的范围与程度。

2 根据调查结果，制定专项补强注浆方案。

3 补强施工完成后，必须重新进行质量检查，重点验证此前不合格的指标。同时，应加密该区段的监控量测，直至变形稳定。

9.5.3 所有不合格项的处理过程与结果均应有详细记录，并作为工程验收文件的重要组成部分。

10 安全与环保

10.1 一般规定

10.1.1 注浆作业人员应经过专业安全技术培训，熟悉注浆设备和工艺流程。电工、焊工、注浆泵操作手等特种作业人员必须持证上岗。

10.1.2 施工前，必须详细调查施工区域内的地下管线（如电缆、光缆、燃气管道、给排水管等）、管沟、人防工程及周边建（构）筑物的位置、埋深和现状，并采取可靠的避让或保护措施。施工过程中应加强巡视监测，防范因注浆压力导致的地面隆起、开裂、管道变形或浆液窜入地下空间。

10.1.3 注浆作业人员必须按规定佩戴个人安全防护装备，包括但不限于安全帽、防护眼镜（护目镜）、防尘口罩、橡胶手套、防护围裙及劳保鞋。

10.1.4 浆液搅拌站及注浆泵应放置平稳，高压注浆管路及其连接部件必须完好、牢固。注浆时，孔口操作人员与泵站操作人员应保持通讯畅通、指令统一，防止因管路松脱或爆裂造成高压浆液喷溅伤人。

10.1.5 搅拌机、注浆泵等设备的检修和清理必须在完全断电、锁闭配电箱并悬挂“禁止合闸”警示牌的条件下进行，钥匙由检修负责人保管，并设专人监护。

10.2 安全施工措施

10.2.1 注浆孔成孔作业安全应符合现行国家标准《岩土工程勘察安全规范》GB 50585 的有关规定。

10.2.2 注浆设备安装与调试应符合下列规定：

1 设备安装应平稳、固定可靠；传动机构、制动装置应紧固有效，外露的皮带轮、电动机、传动轴等转动部位必须设置牢固的防护罩；

2 注浆设备及高压管路应密封完好，连接件紧固，不得有松动或泄漏；

3 压力表应经检定合格，安全阀应进行试压检验，确保其在达到开启压力时能可靠动作卸压；

4 高压注浆管路上应至少安装 2 个卸压阀，并应保证管路首尾各安装 1 个；

5 设备安装后应进行清水试运行，确认各部件工作正常、无渗漏后方可进行注浆作业。

10.2.3 注浆作业安全应符合下列规定：

1 作业人员应按规定佩戴齐全防护装备，注浆时严禁在注浆管口正前方停留，防止高压浆液喷溅伤人；

2 孔口操作人员与泵站操作人员应保持通信畅通、指令统一；停泵后应及时清理泵及管路内残余浆液；

3 当注浆压力出现骤然升高时，应立即停机，不得强行注浆，应在查明原因并彻底卸压后方可进行处理；

4 采用孔口封闭注浆时，注浆前应检查并确认孔口装置的密封性与牢固性，并应采取防爆冲措施。

10.2.4 化学浆液安全管理应符合下列规定：

1 化学浆液应在独立的专用区域进行储存与配制，该区域应通风良好，并设置醒目的安全警示标识，明确管理责任人；

2 操作人员须接受专项安全技术交底与培训，了解所用化学浆液的毒理特性、腐蚀性及应急处理方法。

10.2.5 在隧道、洞室等地下空间内注浆施工时，必须将注浆作业纳入围岩监控量测体系。应实时监测围岩变形与支护结构受力状态，发现变形异常或速率骤增，应立即停止注浆，撤离人员，分析原因并采取有效加固措施。

10.2.6 设备检修与清理必须在完全断电、锁闭配电箱并悬挂“禁止合闸”警示牌的条件下进行，钥匙由检修负责人保管，并应设专人监护。搅拌机运转中严禁进行清理作业。

10.2.7 施工现场临时用电安全应符合现行行业标准《施工现场临时用电安全技术规范》JGJ 46 的有关规定。

10.3 环境保护措施

10.3.1 施工场地应实行封闭管理，保持整洁，施工废料应分类堆放并及时清运。

10.3.2 扬尘控制应符合下列规定：

1 水泥等细颗粒材料应严密遮盖，搅拌作业区应设置降尘设施；

2 运输车辆应采取覆盖等有效防遗撒措施。

10.3.3 注浆废浆处理应符合下列规定：

- 1 非化学注浆废浆须经沉淀池处理，上清液达标排放，沉淀物按建筑垃圾处置；
- 2 化学浆液及其废弃物必须全过程监管，分类收集，并委托有资质的单位进行无害化处置，严禁随意倾倒。

10.3.4 噪声控制应符合现行国家标准《建筑施工场界环境噪声排放标准》GB 12523 的规定，并宜通过选用低噪设备和合理规划施工时间等措施，减少对周边环境的影响。

附录 A（资料性附录） 常用浆液材料及其性能指标

A.1 水泥基浆液

	普通硅酸盐水泥浆	超细水泥浆	水泥-水玻璃双液浆	水泥-聚合物复合浆液
水泥强度等级	≥42.5	≥42.5, 比表面积 ≥800 m ² /kg	≥42.5	≥42.5
水灰比	0.6:1 ~ 1.5:1	1.0:1 ~ 2.0:1	W/C 0.8:1 ~ 1:1, C:S=1:0.5~1:1	0.8:1 ~ 1.2:1
粘度 (mPa·s)	≤30	≤25	≤20 (混合后)	≤25
初凝时间 (min)	30~120	20~90	0.5~1	17~20
终凝时间 (min)	90~300	60~240	1~2	20~40
析水率 (%)	≤5	≤3	≤2	≤4
24 h 抗压强度 (MPa)	≥2.0	≥2.5	≥3.0	≥2.5
28 d 抗压强度 (MPa)	≥5.0	≥8.0	≥6	≥10
适用地质条件	一般破碎岩体	微裂隙 致密岩体	涌水地层	含泥化夹层 需粘结增强
外加剂建议	早强剂、减水剂、膨胀剂	高效减水剂	缓凝剂 (3%~5%)	聚合物乳液 (2%~15%)

注:

所有数据为实验室标准条件下试验值, 施工中应根据现场试验调整;

浆液性能应符合 GB/T 51320-2018 等相关标准;

表中未列出的特种浆液 (如高强微膨胀浆) 应另行试验确定。

A.2 化学浆液

	环氧树脂类	聚氨酯类
粘度 (mPa·s)	≤10	≤15
凝胶时间 (min)	5~30 (可调)	1~10 (可调)
抗压强度 (28d, MPa)	≥5	≥2
粘结强度 (MPa)	≥3.0	≥2.0
渗透系数 (cm/s)	≤1×10 ⁻⁸	≤5×10 ⁻⁸
环保要求	低毒、低挥发	低游离 TDI、无污染
适用条件	微裂隙、高强加固	动水堵漏

注：

化学浆液使用前应进行环保与毒性检测；

凝胶时间可根据工程需要通过催化剂调节；

储存与使用应符合《危险化学品安全管理条例》要求。

附录 B（资料性附录） 注浆施工记录表格式

B.1 单孔注浆记录表

工程名称		隧道名称		记录日期	
注浆循环号		孔号		孔深(m)	
设计终压(MPa)		孔位坐标 X		孔位坐标 Y	
孔位坐标 Z		开孔时间		终孔时间	
钻孔设备		钻头类型		地质岩性	
裂隙发育		涌水情况		吕荣值(Lu)	
稳定流量 (L/min)		试验压力 (MPa)		浆液类型	
水灰比		外加剂种类		掺量(%)	
注浆开始时间		注浆结束时间		总注浆量 (L)	
是否串浆		串浆孔号		异常记录	
操作人员		记录人		监理签字	

B.2 压力-流量实时记录表

时间	压力(MPa)	流量(L/min)	累计注浆量(L)	备注	时间
结束条件： 终压： ____ MPa； 稳定时间： ____ min； 最终流量： ____ L/min					

B.3 压力-流量实时记录表

循环编号	起止里程	孔数	总注浆量(m ³)	平均压力(MPa)	检查孔数	合格率(%)	备注
汇总	总计	=SUM	=SUM	=AVERAGE	=SUM	=AVERAGE	

附录 C (资料性附录) 质量检验报告格式

高地应力隧道注浆质量检验报告

报告编号: _____ 检验日期: ____年__月__日

工程名称:

检验单位:

检验依据: 《高地应力隧道软弱破碎围岩超前注浆技术规程》

检验方法: 取芯检查 压水试验 物探检测 开挖面观察 强度试验

检验位置: 里程范围_____孔号/区域_____

表 1 检验结果

检验项目	检验结果	合格标准	判定
取芯率	____%	≥75%	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
结石体状态描述:			
压水试验透水率	____Lu	≤5 Lu	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
波速提高率	____%	≥15%	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
28 d 抗压强度	____MPa	≥设计值 90%	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
开挖面自稳时间	____h	≥设计值	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
涌水量	____ L/min	≤允许值	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格

表 2 强度试验记录表

试件编号	龄期 (d)	抗压强度(MPa)	备注

综合结论: 合格 不合格 需补强

【处理建议】

检验人员: _____ 审核人: _____ 批准人: _____

(附: 岩芯照片、检测曲线图、试验报告等)