

团 体 标 准

T/CCTAS XX—2024

海底隧道穿越断层破碎带注浆施工指南

Guidelines for grouting construction of subsea tunnel crossing shattered fault zone

征求意见稿

（本草案完成时间：2024-06）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国交通运输协会 发 布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总则 1

5 注浆浆液 2

 5.1 一般规定 2

 5.2 浆液 2

6 施工 3

 6.1 一般规定 3

 6.2 超前锚杆 4

 6.3 超前小导管 4

 6.4 超前长管棚 5

 6.5 超前帷幕 5

 6.6 径向注浆 7

 6.7 压力分区控制及梯度注浆 8

7 检查 8

8 设备与信息化管理 9

 8.1 注浆设备 9

 8.2 注浆信息化管理 9

9 安全与环境保护 9

 9.1 安全施工 9

 9.2 环境保护 10

附录 A 海底隧道穿越断层破碎带施工记录表 11

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。

本文件由中国交通运输协会新技术促进分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：山东大学，山东建筑大学，青岛国信发展（集团）有限责任公司，山东科技大学，中铁第四勘察设计院集团有限公司，青岛国信胶州湾第二海底隧道有限公司。

本文件主要起草人：张庆松，刘人太，冯啸，曲立清，李相辉，陈增荣，倪健，蒋华，王洪波，孙文昊，张咪，张军杰，徐意臻，伍雨，李翔，谭明伦，王希浩，李良浩。

海底隧道穿越断层破碎带注浆施工指南

1 范围

本文件提出了海底隧道穿越断层破碎带注浆施工的基本规定、海洋环境下材料选型、海底断层破碎带加固止水、信息化注浆管理、安全与环境保护的建议。

本文件适用于海底隧道穿越断层破碎带注浆施工。

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/T 175	通用硅酸盐水泥
GB/T 1596	用于水泥和混凝土中的粉煤灰
GB/T 5005	钻井液材料规范
GB/T 39712	快速施工用海工硫铝酸盐水泥
GB 50119	混凝土外加剂应用技术规范
GB 50585	岩土工程勘察安全规范
JC/T 1041	混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料
JC/T 2041	聚氨酯灌浆材料
JC/T 2536	水泥-水玻璃灌浆材料

3 术语和定义

删除[fury Wee]:

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

海底断层破碎带 subsea shattered fault zone

海底断层破碎带是在海底由断层或裂隙密集带所造成的岩石强烈破碎、涌水量大、围岩自稳能力差的地段。

3.2

注浆 grouting

将一定材料配制成浆液，通过压送设备把浆液注入地层内，浆液以填充、渗透、劈裂及压密等方式驱赶地层中的水、空气并占据其空间位置，通过浆液的胶凝、固化达到加固地层及防渗止水的目的。

3.3

超前注浆 advanced reinforcement grouting

为提高隧道开挖施工安全性，开挖前对掌子面前方岩土体进行的注浆作业。

3.4

径向注浆 radial grouting

为控制隧道围岩变形或止水，垂直隧道洞壁布设注浆孔，对隧道周围岩土体进行的注浆作业。

3.5

帷幕注浆 curtain grouting

在洞身外围通过注浆形成相对隔水带，减少洞身涌水量并加固围岩的技术措施。

4 总则

4.1 海底隧道穿越断层破碎带前宜利用超前钻孔、物理探测等手段获取断层破碎带主要填充物、产状、赋水量、与上覆海水导通关系等重要地质信息。

- 4.2 钻爆法穿越海底断层破碎带时，可采取超前小导管、超前长管棚、超前锚杆、全断面帷幕注浆等对围岩进行改造，确保施工安全。
- 4.3 盾构法穿越海底断层破碎带前，可采取超前小导管、周边帷幕注浆等对海底断层破碎带预加固处理。盾构法穿越海底断层破碎带后，宜及时进行壁后径向注浆对围岩进行加固。
- 4.4 编制海底隧道穿越断层破碎带治理专项方案前，应收集下列资料：
- a) 海底隧道的工程地质条件、水文地质条件、风险源等情况；
 - b) 海洋水文数据如波浪、潮汐以及海水的温度、盐度、密度；
 - c) 海底隧道结构的设计图及相关技术资料；
 - d) 海底隧道结构检测监测数据或受损评估报告。
- 4.5 海底隧道断层破碎带治理前应编制专项方案，宜包含（但不限于）以下内容：
- a) 工程特点：对断层破碎带性质分析，确定处治施工难点及要点；
 - b) 治理范围：包括沿海底隧道轴线长度、径向范围等；
 - c) 治理标准：确定治理后达到的加固止水效果和质量指标；
 - d) 治理工艺：超前锚杆、超前小导管、超前长管棚、超前帷幕等；
 - e) 材料选择：包括材料种类和浆液配方；
 - f) 施工方法和顺序：根据实际情况确定合理的施工方法和施工顺序；
 - g) 浆液扩散半径：浆液在设计压力下所能达到的有效加固止水距离；
 - h) 钻孔布置：根据浆液扩散半径和注浆范围，确定合理的孔距、排距、孔数等；
 - i) 注浆压力：设计不同部位和不同深度的允许最大注浆压力；
 - j) 注浆用量：总体浆液消耗量；
 - k) 效果评估：用各种方法和手段检测治理效果。
- 4.6 专项方案实施程序
- 海底隧道注浆施工宜按如下程序进行：
- a) 根据初步确定试验段进行专项方案的现场试验；
 - b) 根据现场试验确定各项技术参数和施工措施；
 - c) 严格根据专项方案进行施工，施工过程中加强对拱顶位移、涌水量等关键信息的监测；
 - d) 根据观测情况对原专项方案进行必要的优化、调整；
 - e) 如实进行施工记录，包括但不限于施工时间、注浆参数等；
 - f) 施工结束后应及时对处治措施进行质量检查，质量达标后方可进行下一阶段的施工。

5 注浆浆液

5.1 一般规定

- 5.1.1 注浆施工所采用的水泥品种，应根据海水侵蚀、注浆目的、地质条件等因素确定。常规条件下可采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或复合硅酸盐水泥等，具体要求应符合 GB 175 的要求。
- 5.1.2 当有抗侵蚀要求或其他特殊要求时，可使用海工硫铝酸盐水泥等特种水泥，具体要求应符合 GB/T 39712。

5.2 浆液

- 5.2.1 浆液的选择应符合表 1 规定：

表 1 浆液选型

裂隙开度	水流速度	适用材料	备注
<0.15 mm	\	磨细水泥、化学浆	当裂隙开度较小，可适用水玻璃/酸性水玻璃进行预处理。当采用预处理后仍难以注入时宜采用化学浆液。
>0.15 mm	探查孔内海水流速<14 cm/min	水泥浆、黏土-水泥浆	
\	岩层渗水量>7 L/(min·m²)且探查孔内海水流速<14.0 cm/min	水泥-水玻璃浆液	
\	探查孔内海水流速>14.0 cm/min	水泥-水玻璃浆液、聚氨酯浆液	

当穿越断层破碎带时遇到以下情况时，可参照表2注浆措施做针对性处理：

表 2 特殊条件下注浆处理措施

地质与水文情况	处理措施
突涌水	先注入粉煤灰、尾矿粉、砂、砾石等惰性材料，再注入水泥-水玻璃浆液；也可在水泥浆液中加入砂、黏土、膨润土、粉煤灰等掺合料；有特殊要求时可加入速凝剂、减水剂、缓凝剂、膨胀剂等外加剂；采用复合注浆，先注悬浊液，再注化学浆液。
海底断层破碎带充填物为强透水性碎石土	采用水泥浆液、水泥-水玻璃浆液、黏土-水泥浆等悬浊液。
当海底断层破碎带充填物为中透水性的粉砂、细砂	用复合注浆，先注悬浊型浆液，在中间排或中间排的后序孔中，宜采用化学浆液。
海底断层破碎带充填物为弱透水性的粉土、粉砂	采用水玻璃类、丙烯酰胺类、脲醛树脂等化学浆液。

5.2.2 根据海底隧道注浆施工需要，掺入浆液的材料应满足表 3 要求：

表 3 浆液掺入料

掺入料	要 求
黏土或黏性土	塑性指数不宜小于14，黏粒（粒径小于0.005 mm）含量不宜少于25%，含砂量不宜大于5%，有机物含量不宜大于3%
膨润土	品质指标应符合GB/T 5005的规定
粉煤灰	根据工程需要可使用F类和C类的I级或II级粉煤灰，其品质指标应符合GB/T 1596的规定
砂	应选择质地坚硬的天然砂或人工砂，以细砂、中砂
注：在浆液中加入的其他掺合料，应通过室内试验或现场试验确定	

5.2.3 根据海底隧道注浆施工需要，可在水泥浆液中加入表 4 外加剂，外加剂的品质应符合 GB 50119 中的有关规定：

表 4 外加剂种类及要求

用 途	外加剂种类
速凝剂	水玻璃、氯化钙、硫酸钠等，或使用硫铝酸盐水泥
减水剂	木质素磺酸盐类普通减水剂、萘系高效减水剂、聚羧酸系高性能减水剂等
稳定剂	膨润土及其他高塑性黏土等
注：外加剂的掺量应根据现场试验确定	

5.2.4 海底隧道注浆施工用水泥-水玻璃浆液宜根据现场条件确定配合比，产品质量应符合现行行业标准 JC/T 2536 的规定。

5.2.5 海底隧道注浆施工用聚氨酯浆液宜先用水溶性材料后用油溶性材料，并应符合设计要求，产品质量应符合现行行业标准 JC/T 2041 的规定。

5.2.6 海底隧道注浆施工用亲水性环氧浆液材料应符合设计要求，产品质量应符合现行行业标准 JC/T 1041 的规定。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 海底隧道穿越断层破碎带等不良地质体时，按处治目的和处治效果可分为超前加固与超前止水，分类见表 5。

表 5 加固止水方案

工法		适用条件
超前加固	超前锚杆/自进式锚杆	在无海水的断层破碎带、薄层水平状岩层，或海底隧道围岩为IV级时，可采用超前锚杆处治措施。在无水松散破碎段，当钢管难以直接顶入时，可采用超前自进式锚杆。
	超前小导管	在软弱、破碎地层中成孔困难或易塌孔，且施作超前锚杆比较困难时可采用超前小导管。
	超前长管棚	在地质条件较差、易发生坍塌时，可采用超前管棚支护。

删除[fury Wee]: 比

超前止水	全断面帷幕注浆/周边帷幕注浆	在掌子面渗水较大,探查到前方存在较大赋水体或存在大型导水通道时,可采取帷幕注浆。
------	----------------	--

6.1.2 在海底隧道穿越断层破碎带时应根据海底地形、海洋水文、工程需求、工作条件及施工方法等因素,采用可靠、耐久、经济的处治措施。在断层带极其松散、软弱、无水的地段,宜采用超前加固措施;在地质条件较差且地下水较为丰富的地段,宜采用超前止水措施。

6.1.3 径向注浆加固主要适用于封堵海底隧道周边小面积渗水以及固结局部围岩。径向注浆具有钻孔深度较浅、注浆压力较低、单孔注浆量较少、钻孔常多排布置的特点。海底隧道径向注浆加固宜按如下程序进行:

- a) 查明海底隧道的工程地质条件、水文地质条件、结构变形控制等;
- b) 根据建设条件、治理目标,初步选定处治方案;
- c) 根据初步确定的处治方案进行现场试验;
- d) 根据现场试验确定各项技术参数和施工措施;
- e) 在施工期间进行观测,根据观测情况对原处治方案进行必要的优化调整。

6.2 超前锚杆

6.2.1 在无海水的断层破碎带、薄层水平状岩层,或海底隧道围岩为IV级时,可采用超前锚杆处治措施。在无水松散破碎段,当钢管难以直接顶入时,可采用超前自进式锚杆。

6.2.2 超前锚杆杆体直径宜为 22~28 mm,自进式锚杆杆体直径宜为 28~76 mm。

6.2.3 超前锚杆长度宜为 350 cm,当围岩条件较差时宜控制在 500 cm 以内,具体长度可根据钢拱架间距及纵向搭接长度确定。自进式锚杆长度宜为 500 cm,地层条件较差时宜控制在 1000 cm 内,实际长度应根据海底地质条件确定。

6.2.4 超前锚杆及自进式锚杆的环向间距宜为 30~40 cm,当地质条件偏差时可取低值,当地质条件偏好时可取高值。

6.2.5 超前锚杆及自进式锚杆的外插角(海底隧道轴线方向与杆体轴线方向的夹角):拱部宜为 5°~20°,两帮宜为 10°~20°。施作锚杆时插入方向应根据岩体结构面产状确定,以尽量使锚杆穿透更多结构面为原则。

6.2.6 超前锚杆纵向搭接长度应不小于 100 cm。自进式锚杆纵向搭接长度应不小于 150 cm,特殊情况下可采用 200~300 cm。

6.2.7 超前锚杆宜采用早强砂浆,强度等级不应低于 M20。自进式锚杆宜采用水泥浆,强度等级不应低于 M20。砂浆的配比宜为水泥:砂=1:1,水灰比一般为 1:0.42~1:0.5。

6.2.8 注浆用的细骨料应符合下列规定:

- a) 水泥砂浆只能用于一次注浆,细骨料应选用粒径小于 2.0 mm 的砂;
- b) 砂的含泥量按重量计不得大于总重量的 3%,砂中云母、有机质、硫化物及硫酸盐等有害物质的含量,按重量计不得大于总重量的 1%。

6.2.9 通过配比试验后水泥注浆材料中可使用外加剂,外加剂不得影响浆体与岩土体的粘结和对杆体产生腐蚀。

6.2.10 应根据锚杆设计承载力及地质条件等因素设计适合的注浆工艺及注浆结束标准,一次注浆和二次注浆结束标准应由注浆量和注浆压力共同确定。

6.3 超前小导管

6.3.1 在海水量较小的断层破碎带、软弱围岩地段,或者在海底隧道开挖后掌子面不能自稳、拱部易出现剥落的地段,可采用超前小导管支护。

6.3.2 超前小导管杆体材料宜采用直径为 42~50 mm 的热轧无缝钢管。

6.3.3 超前小导管杆体长度宜为 350 cm,掌子面稳定性较差时也可采用 500 cm,实际施工长度应根据钢拱架间距及纵向搭接长度确定。

6.3.4 超前小导管环向间距宜为 30~40 cm,外插角宜采用 5°~12°。

6.3.5 超前小导管纵向水平搭接长度不应小于 100 cm,特殊情况下可采用 150~200 cm。

6.3.6 超前小导管设置范围宜为衬砌中线两侧各为 60°~75°区域。当海底地形地质条件明显不对称时应采用不对称布置,当海底地质条件较差时可设置双层小导管并加大纵向水平搭接长度。

6.3.7 小导管管壁应开设注浆花眼，孔径宜为 6~8 mm，间距宜为 15~25 cm，呈梅花形布置，尾端不可开设花眼长度应不少于 500 mm。

6.3.8 超前小导管宜采用水泥浆，水泥浆水灰比可采用 1:0.5 或 1:1。注浆终压力为 0.5~1.0MPa，不透水的地层宜采用高压劈裂注浆。一般按单管达到施工图标示注浆量作为结束标准，当注浆压力达到终压不少于 20min，注浆量仍未达到设计量时亦可结束注浆。注浆结束后将管口封堵，以防浆液倒流管外。

6.4 超前长管棚

6.4.1 在地质条件较差、易发生坍塌的海底断层破碎带，可采用超前管棚支护。

6.4.2 管棚钢管可采用节长 1.6~4.0m、外径宜为 80~180 mm 的热轧无缝钢管。钢管每一接头与相邻钢管接头应错开不小于 500 mm 的距离。

6.4.3 管棚应沿海底隧道开挖轮廓线 100~200 mm 外布设，外插角可采用 5°~15°，倾角大小应能保证管棚钢管不侵入海底隧道开挖轮廓线内。

6.4.4 管棚环向间距宜为 35~50 cm 或按 2.0~2.5 倍钢管外径布置。

6.4.5 钢管管壁可开设注浆花眼，孔径 6~10 mm，间距 20~30 cm，呈梅花型布置，尾部应预留 3~4m 的无花眼止浆段。

6.4.6 海底隧道穿越较大规模断层破碎带时，可采用多循环长管棚，循环长度控制在 10 m 左右，要求每循环长管棚之间搭接长度不小于 300 cm。

6.4.7 长管棚注浆可在钻孔过程中采用前进式注浆，也可在钻孔完成后采用孔口管注浆或利用长管棚钢花管注浆。长管棚的注浆扩散半径可按 0.5~0.6 m 计算，注浆压力与地质条件有关，注浆初始压力宜为 0.5~1.0 MPa，终止压力宜为 2.0 MPa。每孔的注浆量达到设计注浆量或注浆压力达到 2.0 MPa 时，保持 10 min 以上后可结束注浆。

6.4.8 应根据断层透水情况及围岩自稳能力合理选择注浆材料，一般宜选用水泥浆或超细水泥浆，围岩条件较差地带宜选用水泥-水玻璃浆液，对于加固强度要求很高的地段，可选择硫铝酸盐类水泥浆。

6.4.9 注浆完成后，钢管内应以不低于 M20 的水泥砂浆填充。如果地质条件较差，可在钢管内设置钢筋笼或钢筋束。

6.4.10 超前长管棚的注浆量 Q 可根据浆液扩散半径及岩层裂隙率按式（1）估算。

$$Q = \pi r^2 H \eta \beta \cdots \cdots \cdots (1)$$

式中：

- r——浆液扩散半径（m）；
- H——压浆段长度（m）；
- η——岩层裂隙率，可取 1%~5%；
- β——裂隙内浆液有效充填系数，可取 0.3~0.9，视岩层性质而定。

6.5 超前帷幕

6.5.1 海底隧道穿越下列地层时，可采用超前帷幕：

- a) 渗水量较大、涌泥或塌方严重地段；
- b) 海底富水围岩段；
- c) 海水十分丰富的断层破碎带等。

6.5.2 帷幕注浆可根据地质条件、渗水程度及纵向长度等因素，选用全断面帷幕注浆或周边帷幕注浆等方案。

6.5.3 超前帷幕注浆设计应考虑（但不限于）以下因素：

- a) 海底隧道周边的海洋水文和气象；
- b) 海底地层中含水层的渗透性、给水度，软弱夹层允许的渗透比降及海水物理、化学特性；
- c) 海底地层中主要断层破碎带的产状、规模、分布、充填胶结程度及透水性；
- d) 海底地层的岩性，主要岩石分布、风化程度及受扰动是否易失稳。

6.5.4 海底隧道超前帷幕设计流程：

- a) 海底工程地质资料收集及分析，确定帷幕类型；
- b) 确定处治范围，包括注浆段长和止水帷幕厚度；
- c) 止浆墙设计，提供钻孔工作平台、保障施工安全；

- d) 注浆钻孔设计，包括开孔位置、终孔位置、钻孔角度等；
 - e) 根据海底隧道工程条件，选取注浆材料；
 - f) 根据注浆材料及海底隧道内施工条件，选择工艺及设备。
- 6.5.5 帷幕范围应根据处治后海底隧道围岩的承载能力和堵水率要求确定，除特殊情况外，全断面帷幕范围宜自海底隧道轴线至隧道开挖轮廓外不少于 4000 mm 的界线。周边帷幕范围宜自隧道开挖轮廓线至轮廓外 4000~6000 mm 的界线。
- 6.5.6 帷幕注浆浆液宜根据围岩渗漏水情况确定，可根据现场试验结果添加水玻璃等外加剂。水泥浆水灰比可采用 5:1、3:1、2:1、1:1、0.8:1、0.6:1、0.5:1 等七个比级。
- 6.5.7 帷幕注浆孔布置宜按伞形呈辐射状布置，钻孔布置成一圈或数圈，内外圈按梅花形排列，并采用长短孔相结合的形式，同时应避免钻孔施工相互干扰。
- 6.5.8 注浆孔孔底中心间距宜为 1500~3000 mm 或取 1.5~1.7 倍的浆液有效扩散半径。
- 6.5.9 帷幕注浆钻孔深度、倾角及方位角也可根据注浆段长度、注浆范围等作图确定或计算求得。
- 6.5.10 浆液扩散半径宜根据地层孔隙、裂隙及连通性、注浆压力、浆液种类等在现场试验确定，或按式（2）计算。

$$R = \sqrt[3]{\frac{300Khtv_w}{nv_g} + r^3} \dots\dots\dots (1)$$

- 式中：
- R*——浆液扩散半径（cm）；
 - K*——围岩渗透系数（cm/s）；
 - h*——以水头表示的注浆压力（cm）；
 - r*——注浆孔半径（cm）；
 - t*——注浆时间（s）；
 - v_w*——水的粘度（Pa·s）；
 - n*——围岩裂隙率（%）；
 - v_g*——浆液粘度（Pa·s）。
- 6.5.11 超前全断面帷幕注浆顺序宜按“由外到内、自下而上、隔孔跳排”的原则施作。
- 6.5.12 帷幕注浆分段长度和注浆方式应根据不同海底工程地质、海洋水文条件等确定，也可按表 6 采用。

表 6 帷幕注浆分段长度和注浆方式

围岩裂隙发育程度	钻孔出水量（m³/h）	注浆分段长度（m）	注浆方式
发育	≥10	5~10	前进式
较发育	5~10	10~15	前进式
不够发育	2~5	15~20	后退式
不发育	≤2	20~30	一次全孔

- 注浆方式分为前进式注浆、后退式注浆及一次全孔注浆。当岩石破碎、裂隙发育或水压较高时，宜采用前进式注浆；裂隙不够发育、岩层稍好时，宜采用后退式注浆；裂隙不发育时，可全孔一次注浆。
- 6.5.13 超前全断面帷幕注浆宜采用隔排隔孔、分序次进行的注浆方式。后序注浆钻孔可兼作前序注浆效果的检查孔使用。前期注浆效果良好的区域，后期可适当减少钻孔。前期注浆效果薄弱的区域，宜适当增加注浆钻孔。
- 6.5.14 帷幕注浆工程应包含注浆孔、检查孔、加密孔和监测孔。检查孔数量宜为注浆孔数量的 10%，加密孔数量宜为注浆孔数量的 10%~15%，监测孔数量宜为注浆孔数量的 8%~12%。
- 6.5.15 超前全断面帷幕注浆施工前应对工作面进行封闭，可采用加固止浆岩墙或施作现浇混凝土止浆墙。止浆墙的厚度采用平板理论公式（3）进行计算：

$$B = \eta \sqrt{\frac{P \cdot W}{2H \cdot [\sigma]}} \dots\dots\dots (1)$$

- 式中：
- B*——混凝土止浆墙厚度（m）；
 - η*——安全系数，一般取 1.0~1.5，大断面海底隧道的止浆墙厚度计算时安全系数应取大值；

P ——作用在墙上的均布载荷（N）， $P=P_1A$ ；
 P_1 ——注浆终压（MPa）；
 A ——混凝土止浆墙的面积（m²）；
 W ——海底隧道宽度（m）；
 H ——海底隧道高度（m）；
[σ]——混凝土允许抗压强度（MPa）。

- 6.5.16 止浆墙的施作位置应在海底隧道掌子面前，一般采用单级平面型混凝土止浆墙。止浆墙应安全稳定，注浆时无漏浆、漏水现象。
- 6.5.17 应在止浆墙拱部预埋注浆管，使用速凝材料充填墙后空隙，并保证充填严密。
- 6.5.18 帷幕注浆封闭宜采用孔口封闭方式，注浆前应检查封闭器密封性并有防爆出措施。当注浆封闭采用孔内封闭方式时，止浆设备的选择和安装应与注浆方法、注浆压力、注浆孔孔径及地质条件相适应。
- 6.5.19 帷幕注浆结束标准应符合下列规定：
- a) 采用前进式注浆时，注浆段在最大设计压力下的流量不大于 1 L/min 后，继续注浆 15 min，可结束注浆；
 - b) 采用后退式注浆时，注浆段在最大设计压力下的流量不大于 1 L/min 后，继续注浆 10 min，可结束注浆。
- 6.5.20 在帷幕注浆施工前，应对所设计的施工参数进行现场试验，以确定合适的注浆参数、施工工艺。

6.6 径向注浆

- 6.6.1 海底隧道围岩破碎带径向注浆控制标准应基于现场试验，并按以下三个条件进行控制：
- a) 按注浆总量控制；
 - b) 按耗浆量降低率进行控制；
 - c) 按注浆压力进行控制。
- 6.6.2 宜重视浆液扩散半径对注浆工程量的重要影响，可按有关理论公式进行估算。当地质条件较复杂或计算参数不易选取时，应通过现场注浆试验来确定。水泥浆液在裂隙岩石中的有效扩散半径也可按表 7 采用。

表 7 裂隙岩层中水泥浆液的有效扩散半径 R

裂隙开度（mm）	<5	5~30	>30
有效扩散半径 R （m）	2	4	6

- 6.6.3 径向注浆孔的布置应以各注浆孔浆液扩散范围相互重叠为原则，不宜出现注浆“盲区”，也不宜搭接过多而出现浪费。注浆孔布置宜按梅花形或矩形布置，孔间距宜为单孔浆液扩散半径的 1.4~1.7 倍。
- 6.6.4 注浆顺序不宜采用单向推进压注方式，应按跳孔间隔注浆方式进行，并宜符合以下规定：
- a) 在有海水渗流的特殊情况下，除应考虑材料选型外，还应考虑浆液在动水作用下的迁移，宜从水头高的一端开始注浆；
 - b) 注浆时应采用先外围后内部的注浆顺序。
- 6.6.5 当注浆压力突然上升或下降、或流量突然增大时应立即停止注浆，查明原因并应采取下列措施：
- a) 疏通管道或采取封堵措施；
 - b) 调整注浆压力、浆液浓度、浆液凝结时间或加入惰性材料；
 - c) 采取间歇注浆、限制进浆量等措施。
- 6.6.6 当径向注浆孔达到以下标准时，可结束该孔注浆：
- a) 注浆压力逐步升高，达到设计终压后继续注浆 10min 以上；
 - b) 实际注浆量达到设计注浆量的 80%以上，进浆流量降低为开始进浆流量的 1/4 以下。
- 6.6.7 径向孔全部注浆完成后，应进行注浆效果检查和评定，不合格者应补充钻孔注浆。检查方法有：
- a) 对注浆过程中的各种记录资料综合分析，检查注浆压力和注浆量变化是否合理以及是否达到设计要求；
 - b) 设置检查孔，检查孔应取岩芯（成孔率不低于 75%），观察浆液充填情况；

- c) 围岩严重破碎带涌水量应小于 0.2 L/(min·m)，且某一处漏水量小于 10 L/min；
 - d) 一般地段涌水量应小于 0.1 L/(min·m)，且某一处漏水量小于 5 L/min；
 - e) 采用其他可行的物探方法，辅助检查注浆效果。
- 6.6.8 海底隧道围岩破碎带径向注浆治理后，隧道围岩渗透系数应降低至 $10^{-5}\sim 10^{-6}$ cm/s 以下，或海底隧道抽排水量应不大于 $0.3\text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ 。
- 6.6.9 无海水侵蚀条件下，海底隧道后续施工时间宜为注浆结束后 7 d。
- 6.6.10 在海水侵蚀条件下，海底隧道后续施工时间宜为注浆结束后 14 d～28 d。

6.7 压力分区控制及梯度注浆

- 6.7.1 当海底断层破碎带充填物为淤泥质或强风化产物，可采取注浆压力分区控制进行超前帷幕注浆作业。进行压力分区控制注浆作业前应进行预注浆试验，确定起劈压力、最大劈裂距离等参数。
- 6.7.2 帷幕注浆压力可根据海水压力、海底岩层强度、海底岩层渗透能力等因素确定：
- a) 全断面帷幕注浆初始压力应大于静水压力，周边帷幕注浆初始压力可按（4）式进行计算。

$$P=\sigma_3 + \sigma_t\cdots\cdots\cdots (1)$$

- 式中：
- P ——初始注浆压力（MPa）；
 - σ_3 ——被注岩体最小主应力（MPa）；
 - σ_t ——被注岩体抗拉强度（MPa）。
- b) 帷幕注浆终止压力宜为静水压力 2.0～3.0 倍，裂隙较发育的岩体帷幕注浆压力宜取小值，其他岩体帷幕注浆压力宜取大值。同时，泥质断层带等以劈裂注浆为主的可提高至静水压力的 5 倍。
- 6.7.3 根据浆液扩散半径与钻孔间距确定注浆流量，当注浆压力达到注浆终压后梯度减小注浆流量，逐渐压密破碎带，以增强注浆加固效果。
- 6.7.4 注浆过程中应密切关注海底隧道洞周围岩、掌子面变形及渗水情况，当变形迅速变大或涌水量显著增加时，应迅速停止注浆。

7 检查

- 7.1 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。
- 7.2 超前锚杆注浆质量检查主要包括浆体强度，且现场计量数据与送检试样强度应符合设计要求。
- 7.3 超前小导管注浆量、注浆压力、配合比应符合设计文件要求，应检查所有小导管注浆施工记录及浆液配比单。对每个加固区段应不少于一处进行开挖观察检查，并取芯检验。
- 7.4 超前长管棚注浆结束后应对管棚质量进行检查，实测项目应符合表 8 规定，管棚仰角、搭接长度及与受力拱架的连接应符合设计文件要求。

表 8 管棚实测项目

实测项目	允许偏差	实测数量	
		范围	根数
方向角	1°	每10根	3
孔深	±50 mm		
孔口距	±30 mm		

- 7.5 超前帷幕注浆孔全部完成后，应进行注浆效果检查和评定，不合格者应补充钻孔注浆。工作面每段设 2～3 个检查孔，检查孔应取岩芯，同时观察液充填情况，并采用以下原则评定检查孔内涌水量：
- a) 单孔涌水量应小于 0.2 L/(min·m)且某一处漏水量小于 10 L/min；
 - b) 进行压水检查，在 1 MPa 压力下进水量小于 2 L/(min·m)；
 - c) 或采用其他可行的物探方法，辅助检查注浆效果。径向注浆应采取钻孔取芯法对注浆效果进行检查，必要时应进行压(抽)水试验，当检查孔的吸水量大于 1.0 L/min·m 时，应进行补充注浆。

8 设备与信息化管理

8.1 注浆设备

8.1.1 锚杆、小导管、管棚注浆应配备与工艺相适应的注浆设备、搅拌设备及其他设备，不可临时拼凑，以保证注浆质量。

8.1.2 根据注浆工艺，应配有单液注浆泵、双液注浆泵(或两台单液注浆泵)，其注浆压力应不小于 5MPa，排浆量应大于 50 L/min 并可连续注浆。

8.1.3 搅拌普通水泥浆的设备可选用低速机械式搅拌机，其搅拌有效容积不小于 400L；搅拌改性水玻璃的设备宜选用高速机械式搅拌机或自制风动搅拌机。

8.1.4 集中制浆站的制浆能力和水泥等材料储备量应满足施工期最大用浆量需要，宜采用具备自动配料、计量、拌制及输送浆液功能的自动化制浆系统。当浆液中需加入掺合料或外加剂时，应增设相应的设备。

8.1.5 所有施工设备应注意维护保养，保证其正常工作状态并应有备用量。所有计量仪器、仪表均应有产品合格证及检定单位检定。

8.2 注浆信息化管理

8.2.1 注浆施工信息管理系统与主体工程信息管理平台之间应能够实现通信联系，以满足上、下两级系统对施工数据交互和共享的要求。

8.2.2 注浆记录仪应具备以下功能：

- a) 实时连续自动测量、显示及记录单孔或多孔注浆作业的注浆时间、注入浆量、注入流量、注浆压力（记录间隔时间段内的平均压力和最大压力）、浆液密度等数据；
- b) 数据的云端实时传输、储存、监控及共享等云技术功能；
- c) 数据的加密、防伪及保护功能；
- d) 防过载、断电保护及抗电磁干扰功能；
- e) 适用于纯压式注浆、循环式注浆；
- f) 适用于多种水灰比的水泥浆液和压水试验。

8.2.3 应积极推行注浆施工的数字化管理，通过物联网及互联网等信息化工具，建立注浆过程实时监控、注浆数据采集及云端传输、存储、防护和处理系统。应通过管理和技术措施确保采集数据的真实性、可靠性。

8.2.4 应通过电脑或移动客户端依据权限在线实时检视注浆施工数据库资料，包括各工程部位注浆孔即时施工数据、已完注浆段效果测试数据、注浆施工记录表等资料，并可输出与打印。

8.2.5 条件具备的工程，可应用注浆施工自动化和智能化控制。智能化注浆的硬件和软件设计可遵照下列要求：

- a) 自动注浆控制系统应能实现压水试验、注浆作业工序的自动转换以及注浆作业中的注入流量—注浆压力—浆液水灰比的协调变换，直至满足设计要求的结束条件，自动结束；
- b) 自动化注浆作业可由一套控制系统管理一台注浆泵工作，也可由一套系统管理多台注浆泵同时工作；
- c) 智能化注浆宜在自动化注浆的基础上引入人工智能系统，实现对注浆过程进行的实时优化决策和对特殊情况的处置；
- d) 自动化和智能化注浆应在注浆现场试验的基础上适当简化和优化施工程序。

9 安全与环境保护

9.1 安全施工

9.1.1 应严格按照相关规定和标准对材料、设备等产品进行进场质量验收，在外观质量检查和质量证明文件（质量合格证、规格、型号及性能检测报告等）核查的基础上，按进场的批次和规定的方案进行抽样检验检测；检验检测应当有书面记录和签字，并留档备查。

9.1.2 海底隧道施工现场应建立安全和管理制度，配备专职管理人员，明确管理责任。海底隧道注浆施工应采取有针对性的安全保证措施和环境保护措施，对重大危险源和重要环境因素应进行辨识，并应制定相应的控制措施和应急预案。

9.1.3 注浆作业人员应经岗位培训合格后上岗，特种作业人员应持证上岗。施工前应进行安全教育和安全技术交底。

9.1.4 海底隧道注浆施工前，应详细调查注浆作业区内设施并应采取避让和保护措施。施工现场应设置安全防护设施和安全警示、警告标志。

9.1.5 注浆施工过程中应遵守安全操作规程，不得违章作业。应加强安全和环境的巡视检查，发现隐患应立即整改。

9.1.6 注浆作业人员应佩戴安全帽、护目镜、口罩、橡胶手套、围裙、鞋罩和耳塞等防护用品。

9.1.7 注浆泵应指定专人操作并应与其他人员密切配合，由孔口人员统一指挥开泵、加压、停泵等操作。设备安装应符合下列规定：

- a) 注浆设备和高压管路应安装密封，无泄漏，零部件应紧固无松动；
- b) 安全阀和压力表应安装正确，安全阀应进行试压检验并确保在达到开启压力时能卸压；
- c) 注浆高压管路上应至少安装 2 个卸压阀，并应保证管路首尾各安装 1 个；
- d) 设备安装后应采用清水试机；

9.1.8 设备的传动机、装置和制动器应紧固，皮带轮、电动机、传动轴和搅拌机等应有防护罩。

9.2 环境保护

9.2.1 海底隧道内施工场地应通畅并保持整洁，施工废料应分类堆放，集中处理。

9.2.2 水泥等细颗粒散体材料应在库内存放或严密遮盖，搅拌区域应设置防尘棚。不得焚烧包装材料及其他废料。

9.2.3 运输易飞扬的细颗粒散体材料时应覆盖或封闭，不得遗漏；装卸时应采取控制扬尘措施。

9.2.4 注浆区段应设立专用废浆沉淀池，并保证场地排水系统应畅通。废水应经陆上集中处理达标后排放，不得直接排放。对腐蚀性溶液，应按国家相关规定进行处置。

9.2.5 注浆施工过程中，应采取措施防止浆液泄露，减少对海洋环境污染。

附 录 A 海底隧道穿越断层破碎带施工记录表

(资料性)

表A.1规定了钻孔施工的数据记录类型。

表A.1 钻孔施工记录表

工程名称：_____工作面位置（里程）：_____

钻机型号：_____时间：_____年_____月_____日

孔号	孔径	孔深	起止时间	下管深度	地层情况描述	备注

- 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. 2规定了钻孔注浆的数据记录类型。

表A. 2 钻孔注浆记录表

工程名称：_____

工作面位置（里程）：_____

孔号：_____

孔深：_____

注浆泵型号：_____

时间：_____年_____月_____日

起止时间	浆液种类	配合比	凝胶时间（s）	压力（MPa）	流量（L/min）	备注

填表说明：

备注栏填漏浆、串浆情况。

总注浆量：_____

材料消耗：_____

记录：_____

技术负责人：_____

表A.3规定了工程注浆数据的记录要求。

表 A.3 工程注浆统计记录表

名称：_____ 工作面范围（里程）：_____
注浆时间：_____年____月____日____时 ~ _____年____月____日____时

孔号	孔深（m）	浆液种类	终压（MPa）	注浆量（m³）	备注

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。
记录：_____ 技术负责人：_____ _____年____月____日