|  |  |
| --- | --- |
| ICS  | 93.160 |
| CCS  |

|  |
| --- |
|  |

P 55 |

团体标准

T/CASMES XXXX—XXXX

富水软弱地层水工隧洞灌浆技术规范

Technical spesification for hydraulic tunnel grouting of water-rich and soft stratum

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

中国中小企业协会  发布

目次

[前言 III](#_Toc180075703)

[1 范围 4](#_Toc180075704)

[2 规范性引用文件 4](#_Toc180075705)

[3 术语和定义 4](#_Toc180075706)

[4 基本规定 6](#_Toc180075707)

[5 工程地质勘察 6](#_Toc180075708)

[5.1 一般规定 6](#_Toc180075709)

[5.2 地质勘察方法 6](#_Toc180075710)

[5.3 超前地质预报方法 7](#_Toc180075711)

[5.4 围岩评价与验收 8](#_Toc180075712)

[6 灌浆材料选型 8](#_Toc180075713)

[6.1 一般规定 8](#_Toc180075714)

[6.2 水泥单液浆 8](#_Toc180075715)

[6.3 水泥-水玻璃双液浆 9](#_Toc180075716)

[6.4 高渗型灌浆材料 10](#_Toc180075717)

[6.5 “渗透+劈裂”复合型灌浆材料 10](#_Toc180075718)

[6.6 动水封堵灌浆材料 10](#_Toc180075719)

[7 灌浆方案设计 10](#_Toc180075720)

[7.1 一般规定 10](#_Toc180075721)

[7.2 洞内帷幕灌浆 11](#_Toc180075722)

[7.3 地面灌浆 16](#_Toc180075723)

[8 施工组织 18](#_Toc180075724)

[8.1 一般规定 18](#_Toc180075725)

[8.2 施工准备 19](#_Toc180075726)

[8.3 止浆墙施工 19](#_Toc180075727)

[8.4 钻孔 19](#_Toc180075728)

[8.5 制浆 20](#_Toc180075729)

[8.6 洞内帷幕灌浆过程 21](#_Toc180075730)

[8.7 地面灌浆过程 24](#_Toc180075731)

[8.8 帷幕灌浆过程监测 25](#_Toc180075732)

[8.9 地面灌浆过程监测 25](#_Toc180075733)

[8.10 隧洞结构及周边环境监测 25](#_Toc180075734)

[9 质量检测与效果评价 25](#_Toc180075735)

[9.1 一般规定 25](#_Toc180075736)

[9.2 检查孔法 26](#_Toc180075737)

[9.3 灌浆试验法 26](#_Toc180075738)

[9.4 物探法 27](#_Toc180075740)

[9.5 资料分析法 27](#_Toc180075741)

[9.6 帷幕灌浆质量评定 27](#_Toc180075742)

[9.7 地面灌浆质量评价 27](#_Toc180075743)

[附录A（规范性） 钻孔钻探记录表 29](#_Toc180075744)

[附录B（规范性） 钻孔施工记录表 30](#_Toc180075745)

[附录C（规范性） 注浆施工记录表 31](#_Toc180075746)

[附录D（规范性） 压水试验记录表 32](#_Toc180075747)

1. 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。

本文件由山东大学提出。

本文件由中国中小企业协会归口。

本文件起草单位：山东大学、云南省滇中引水工程建设管理局、中国水利水电第十四工程局有限公司、昆明理工大学。

本文件主要起草人：XXX、XXX、XXX。

富水软弱地层水工隧洞灌浆技术规范

* 1. 范围

本文件规定了富水软弱地层水工隧洞灌浆技术的基本规定、工程地质勘察、灌浆材料选型、灌浆方案设计、施工组织、质量检测与效果评价。

本文件适用于富水软弱地层水工隧洞的洞内帷幕灌浆技术和地面灌浆技术的设计、施工和验收。

* 1. 规范性引用文件

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

GB 175 通用硅酸盐水泥

GB/T 4209 工业硅酸钠

[GB 50487—2008](http://standard.sist.org.cn/StdSearch/stdDetail.aspx?AppID=GB%2050487-2008&v=%u6C34%u5229%u6C34%u7535%u5DE5%u7A0B%u5730%u8D28%u52D8%u5BDF%u89C4%u8303%24) 水利水电工程地质勘察规范

GB/T 50511—2022 煤矿井巷工程施工标准

DL/T 5148 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范

DL/T 5237 灌浆记录仪技术导则(附条文说明)

JTG C20 公路工程地质勘察规范

JGJ 63 混凝土用水标准

JGJ/T 211 建筑工程水泥—水玻璃双液注浆技术规程

SL 377 水利水电工程锚喷支护技术规范

SL 725 水利水电工程安全监测设计规范

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

富水软弱地层 water-rich and soft stratum

富水软弱地层是指处于地下水位线以下的软塑状黏土层、砂土层、全风化岩土层、充填型断层带、碎粉岩地层、碎裂岩地层等，具有遇水软化、强度低、自稳性差等特点，在地应力、渗透压力作用下极易产生较大变形，甚至诱发塌方、突水突泥、软岩大变形等地质灾害。

洞内帷幕灌浆 tunnel curtain grouting

为提高隧洞围岩稳定性、减少涌水量，在隧洞开挖面或衬砌洞段（初支/二次衬砌）处，利用钻孔和灌浆设备将浆液注入隧洞围岩中，在隧洞周围一定范围内形成加固区或相对隔水带的灌浆技术，可有效防止隧洞突水突泥、围岩变形或坍塌。

地面灌浆 surface grouting

采用定向钻技术沿目标施工方向钻成超长灌浆孔，结合多级套管将灌浆管路输送到目标地层开展超远距离预灌浆加固作业，浆液通常由灌浆孔注入隧洞周围的土体或岩石内，增强围岩的稳定性和强度，防止土体变形或坍塌，确保隧洞施工的安全进行。

全断面帷幕灌浆 full section curtain grouting

对隧洞开挖面前方及开挖轮廓线外一定范围的围岩进行的帷幕灌浆，在围岩内形成一道连续的防渗帷幕的灌浆方式。

周边帷幕灌浆 surrounding curtain grouting

通过布置环形搭接超前灌浆孔，形成有效的止水帷幕，当止水帷幕达到一定强度后，再进行控制开挖的富水隧洞段施工方法。

局部帷幕灌浆 partial curtain grouting

针对隧洞开挖面前方地层特点，对隧洞围岩局部薄弱区域进行的帷幕灌浆，具有钻孔数量少、施作周期短的特点。

径向帷幕灌浆 radial curtain grouting

为控制水工隧洞围岩变形或止水，沿隧洞初支或二次衬砌垂直于水工隧洞轴线方向布设灌浆孔，对隧洞围岩进行灌浆。

浆液扩散半径 diffusion radius of grouting

浆液在围岩内沿钻孔径向扩散的有效距离。

灌浆终压 final grouting pressure

灌浆结束时灌浆孔口处注入浆液的压力。

全孔一次性灌浆 full hole grouting

按钻孔设计深度一次性施作完成灌浆钻孔，再对钻孔全孔段实施灌浆。

前进式分段灌浆 forward segmented grouting

从孔口至孔底由浅及深逐段进行钻孔灌浆施工，在实施过程中采取钻孔一段、灌浆一段的施工方法，再复钻并延伸原钻孔深度、再灌浆一段的交替作业方式，直至完成全孔段灌浆。

后退式分段灌浆 backward segmented grouting

在施工完成钻孔内分段安设止浆装置，从孔底至孔口由深及浅逐段进行灌浆施工。

止浆墙 grout-plugging wall

在水工隧洞中灌浆位置，预先构筑的可以承受最大灌浆压力并防止漏浆、跑浆的混凝土构筑物。

孔口管 borehole orifice tube

在钻孔孔口段安装的外露一定长度、可外连灌浆管路并能起防塌、隔压和灌浆导向作用的钢管。

灌浆材料 grouting materials

灌浆材料是指在压力作用下可注入地层、岩石或构筑物的缝隙、孔洞中，达到增加承载能力、防止渗漏及提高构筑物整体性能等效果的流体材料，有主剂、溶剂（水或其他溶剂）及外加剂（固化剂、稳定剂等）混合而成。灌浆材料通常是指浆液中的主剂。

* 1. 基本规定

应根据富水软弱地层水工隧洞的工程地质、水文地质、工程特点、周边环境、生态保护、施工风险等综合因素，合理制定水工隧洞灌浆设计与施工方案，并进行专项设计。

富水软弱地层隧洞灌浆应贯彻动态设计与信息化施工的理念，根据水工隧洞实际工程地质与水文地质条件、洞内灌浆和地面灌浆实施效果及时调整灌浆施工方案。

隧洞灌浆应根据施工中实际揭露或探测的地质情况，进行相应的补充勘察。

隧洞灌浆施工前应编制专项施工方案。

隧洞灌浆材料应具有较好的流动性、可注性、胶结性和可控性，并符合环保要求。灌浆浆液类型选择应充分考虑灌浆目的、地质条件、工程实施条件、环境影响等多种因素。

应根据隧洞灌浆技术要求，选择合理的施工设备。施工设备应满足工程施工需要，确保连续安全作业，并符合有关规范和产品质量标准。

隧洞灌浆实施前应开展现场灌浆试验。

隧洞灌浆施工过程中产生的废水、废浆等废弃物处理应符合环保要求。

应对隧洞灌浆过程中的每循环灌浆质量进行检测评价，满足要求后方可进行下一循环灌浆作业。

隧洞灌浆施工过程中，应及时、准确填写施工记录，每循环灌浆施工完成后应进行技术总结。

* 1. 工程地质勘察
		1. 一般规定

富水软弱地层水工隧洞灌浆工程地质勘察宜采用地质调查、钻探、物探等多种手段及其组合的综合地质勘察方法，查明地质构造、地层岩性、地下水类型、补给、径流与排泄条件、地下水压力与流量等。

隧洞灌浆勘察应重点查明断层及影响带、岩溶、富水软弱破碎带、蚀变带、节理裂隙发育带等不良地质情况。

水工隧洞灌浆的工程勘察范围及内容应符合JTG C20的有关规定，并符合隧洞灌浆设计与施工要求。

宜将隧洞灌浆施工过程中的钻孔地质信息、涌水量、水压信息等纳入灌浆勘察资料综合分析中，以便对灌浆设计施工进行动态调整。

* + 1. 地质勘察方法

地质调查应以隧洞洞内调查为主，辅以地表补充调查。

隧洞洞内地质调查应包括下列主要内容：

1. 查明隧洞围岩岩性、地质构造、岩溶发育等工程地质条件；
2. 查明水文地质条件：
	1. 地下水的空间分布、补给和排泄条件及水量、水压、水温、颜色、泥砂含量、水质等；
	2. 洞内出水点与地层岩性、地质构造、岩溶、暗河、地表水等的关系。

隧洞地表补充地质调查应包括下列主要内容：

1. 对已有地质勘察成果的核查和确认；
2. 地层、岩性在地表的出露及接触关系；
3. 断层、褶皱、节理密集带等地质构造在地表的出露位置、规模、性质及其产状变化情况；
4. 岩溶发育范围、程度、规模及分布规律；
5. 工程区域地形地貌及气候气象条件；
6. 分析隧洞突水突泥与地表径流、降水及地下水运移补给之间的关系。

洞内超前地质钻探宜符合下列技术要求

1. 隧洞超前地质钻探采用回转取芯方式；
2. 钻孔数量不少于3个；
3. 钻孔深度为30 m～50 m，必要时也可钻50 m以上的深孔；
4. 钻孔直径满足取样和孔内测试要求；
5. 岩溶发育、围岩破碎及受地质构造影响的富水区域，钻孔探测范围不小于隧洞开挖轮廓线以外15 m或灌浆加固圈厚度。

超前钻探实施过程中应采取下列措施，防止发生地下水突涌：

1. 钻孔完成后安设孔口管与高压球阀，孔口管与钻孔的孔壁固定牢靠，可采用环氧树脂、锚固剂、高强度速凝微膨胀浆液等进行固定，并进行耐压试验，耐压能力不应小于区域最高地下水压力；
2. 若存在水压高、涌水量大的高风险区段，应设有避险场所；
3. 当钻孔中的水压、水量突然增大时，应立即停止钻进，必要时应将现场施工人员撤离危险区域。
	* 1. 超前地质预报方法

富水软弱地层施工应当进行超前预报，在特殊的高风险施工洞段，应采用专项超前地质预报与综合超前地质预报的双保险预报。

遇下列现象时，应对其产生原因、性质和可能的危害作出分析判断，并及时进行预报：

1. 围岩不断掉块，洞室内灰尘突然增多，支撑变形或连续发出响声；
2. 围岩顺裂缝错位、裂缝加宽、位移速率加大；
3. 出现片帮、岩爆或严重鼓胀变形；
4. 出现涌水、涌沙、涌水量增大、涌水突然变浑浊现象，地下水化学成分产生明显变化；
5. 干燥岩质洞段突然出现地下水流，渗水点位置突然变化，破碎带水流活动加剧，土质洞段含水量明显增大；
6. 地温突然发生变化，洞内突然出现冷空气对流；
7. 钻孔时，纯钻进速度加快且钻孔回水消失，经常发生卡钻。

施工地质预报应包括下列内容：

1. 未开挖洞段的地质情况和可能出现的工程地质问题；
2. 可能出现坍塌、涌沙、突泥与突水的位置、规模及发展趋势，含有害气体地层的位置。

围岩处理措施建议应包括下列内容：

1. 开挖处理的位置、范围、深度和体积；
2. 置换、回填处理的位置、范围和深度；
3. 灌浆的范围和深度；
4. 支护的类型、范围和时机；
5. 防渗帷幕、排水孔（洞）的位置、深度和方向；
6. 地下水的排、截、堵、引。
	* 1. 围岩评价与验收

施工过程中应综合利用各种勘察资料及施工地质成果，不断深化地下开挖工程围岩工程地质评价。

地下开挖工程总体或分段工程地质评价宜包括下列内容：

1. 围岩工程地质条件、工程地质类型、工程地质分段；
2. 不利块体、不良地质洞段处理建议及工程处理是否满足要求；
3. 岩土物理力学参数、渗透性；
4. 复核围岩压力、弹性抗力系数和外水压力；
5. 需进行后续处理的地质问题和运行期的监测项目。

围岩工程地质分类应按 [GB 50487—2008](http://standard.sist.org.cn/StdSearch/stdDetail.aspx?AppID=GB%2050487-2008&v=%u6C34%u5229%u6C34%u7535%u5DE5%u7A0B%u5730%u8D28%u52D8%u5BDF%u89C4%u8303%24)中附录A的规定执行。

复核围岩压力时应考虑下列因素：

1. 围岩工程地质类型及岩体结构；
2. 上覆岩体厚度及完整性；
3. 不利块体的位置、特征及其稳定性；
4. 支护或加固处理的效果。
	1. 灌浆材料选型
		1. 一般规定

为防治富水软弱地层水工隧洞施工过程中突水突泥、塌方、软岩大变形等地质灾害的发生，根据水工隧洞工程情况、工程地质条件、水文地质条件和灌浆目的，从地层适用性、水文地质条件适用性、可操作性、耐久性以及经济环保性等方面综合比选出适用性强的灌浆材料，开展水工隧洞灌浆施工作业，可有效提升围岩稳定性，保障工程建设安全。

* + 1. 水泥单液浆

水泥作为最常用的灌浆材料，具有来源丰富、价格低廉、强度高、配套灌浆工艺简单的优点，使得单液水泥浆在工程中得到广泛应用。单液水泥浆基于水化反应，形成的结石体具有较高的强度和良好的抗渗性能，可有效防止地下水或其他流体的渗漏，符合水工隧洞灌浆的主要目的。

灌浆工程所采用的水泥品种，应根据灌浆目的、地质条件和环境侵蚀作用等因素确定，通常可采用普通硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、超细水泥等。

普通硅酸盐水泥具有强度高、耐久性好、材料来源广、价格低廉等优点，适用于渗透系数大于10-2 cm/s的粗砂、粗砂、砂砾石、砂卵石以及断层破碎带的灌浆作业。此外，宽度大于0.2 mm的裂隙岩体灌浆宜选用普通水泥浆。

对于渗透系数为10-2 cm/s～10-4 cm/s的中细砂层，可选用粒径较小的超细水泥作为灌浆材料，相对于普通水泥稳定性和流动性有所改善。

通常水泥单液浆搭配外加剂使用，外加剂种类和掺量宜通过室内试验确定，一般可选用以下材料：

1. 速凝早强剂：水玻璃、氧化钙、铝酸钠、三乙醇胺+氯化钠等；
2. 减水剂：木质素磺酸盐、聚羧酸等；
3. 缓凝剂：酒石酸、水杨酸、磷酸盐等；
4. 膨胀剂：氧化镁、过烧氧化钙、铝粉等；
5. 抗分散剂：聚醋酸乙酯、聚乙二醇、聚丙烯酰胺等。

水溶性外加剂应以水溶液状态加入，外加剂掺量参见表 1。

1. 水泥浆外加剂掺量

| 外加剂类型 | 外加剂名称 | 掺量占水泥重量(％) |
| --- | --- | --- |
| 速凝早强剂 | 水玻璃 | 2.0～3.0（单液灌浆） |
| 氧化钙 | 1.0～2.0 |
| 氯酸钠 | 1.0～5.0 |
| 三乙醇胺+氯化钠 | 0.03～0.1+0.3～1.0 |
| 减水剂 | 木质素磺酸盐 | 0.2～0.3 |
| 聚羧酸 | 0.75～1.5 |
| 缓凝剂 | 酒石酸 | 0.1～0.5 |
| 水杨酸 | 0.05～0.2 |
| 磷酸盐 | 0.1～1.0 |
| 膨胀剂 | 氧化镁 | 2.0～6.0 |
| 过烧氧化钙 | 5.0～10.0 |
| 铝粉 | 0.005～0.02 |
| 抗分散剂 | 聚醋酸乙酯 | 1.5～2.5 |
| 聚乙二醇 | 3.0～4.0 |
| 聚丙烯酰胺 | 4.5～5.5 |

* + 1. 水泥-水玻璃双液浆

水泥-水玻璃灌浆材料具有成本低、强度高、凝结时间可控等优势。在穿越富水软弱地层时，极易诱发突涌水灾害，而水泥单液浆材料难以有效封堵渗涌水通道，易浪费材料和延误工期。因此，当涌水量大于100 L/min时，宜采用水泥-水玻璃双液灌浆材料，浆液凝结时间和灌浆参数可根据现场涌水情况和地质情况确定。

水泥-水玻璃灌浆材料通常由水泥浆液和水玻璃两组分制成，其中，水泥浆液性能应符合 GB 175 的规定，通常采用硅酸盐水泥，水泥浆液水灰比为0.4:1～1:1；水玻璃一般采用工业硅酸钠，应符合GB/T 4209 的规定，模数宜在2.4～3.4之间选择，浓度宜为30～50波美度；拌合用水应符合JGJ 63 的规定。水泥-水玻璃灌浆材料，建议水泥浆液和水玻璃体积比的范围为1:0.1～2。

水泥-水玻璃灌浆材料反应过程由水泥的水化反应和水化产物氢氧化钙与硅酸钠反应组成，通过调节水泥浆液和水玻璃的不同配合比，实现灌浆材料初凝时间的调控，初凝时间宜采用倒杯法测定。

* + 1. 高渗型灌浆材料

针对可注性差的富水致密软弱地层，以水泥浆液为代表的悬浮液类灌浆材料在该类地层中难以有效扩散，加固效果不佳，需采用高渗透型灌浆材料进行加固抗渗处治，提高围岩稳定性。

高渗透型灌浆材料一般为低粘度溶液型灌浆材料，通常包括水玻璃类、低粘环氧树脂类和丙烯酸盐类材料。

* + 1. “渗透+劈裂”复合型灌浆材料

“渗透+劈裂”型复合灌浆材料以水泥基组分作为浆脉骨架液，渗透交联液宜采用丙烯酸盐等高渗透水溶性材料。

灌浆过程中，浆脉骨架液在灌浆压力作用下劈裂致密软弱地层，并携带渗透交联液。在劈裂过程中，渗透交联液渗入骨架液周围岩/土体，达到进一步加固、抗渗治理效果。

“渗透+劈裂”型复合灌浆材料适用于富水致密软弱地层的加固抗渗处治，浆脉骨架液水灰比宜大于0.5，浆脉强度宜大于10 MPa，渗透交联液粘度宜低于10 cP，固砂强度大于1 MPa，浆脉骨架液与渗透交联液体积比宜在1:0.5～1.5。

* + 1. 动水封堵灌浆材料

针对富水软弱地层的突涌水灾害，具有流速快、流量大、压力高的特点，宜采用动水封堵灌浆材料。

动水封堵材料将动水抗分散性、络合与氯离子的键合固溶的硅酸盐树胶作为主剂，形成抗分散核-壳结构。12 h单轴抗压强度宜达到0.8 MPa～1.0 MPa，72 h单轴抗压强度宜达到 2 MPa～5 MPa，初凝时间20 s～45 min可调，1.2 m/s动水下浆液留存率达到70％以上。

动水封堵材料宜采用高压灌浆工艺，开展涌水通道封堵作业。

* 1. 灌浆方案设计
		1. 一般规定

隧洞灌浆方案设计应充分考虑地质条件和灌浆目的，宜在工程类比分析基础上，辅以理论计算综合确定。

洞内灌浆一般采用帷幕灌浆方法，主要包括的内容有：

1. 灌浆目的和技术要求；
2. 灌浆范围；
3. 灌浆孔布置和灌浆顺序；
4. 浆液材料和配合比；
5. 灌浆工艺及参数；
6. 灌浆设备；
7. 止浆墙型式与厚度；
8. 灌浆监测措施；
9. 灌浆质量检测评价等。

洞外灌浆一般采用地面灌浆方法，主要包括的内容有：总体施工方法、灌浆范围、灌浆孔布置和灌浆顺序、浆液材料和配合比、灌浆工艺及参数、灌浆设备、灌浆监测措施、灌浆质量检测评价等。

* + 1. 洞内帷幕灌浆
			1. 灌浆范围

帷幕灌浆型式应根据水工隧洞水文地质条件和堵水加固要求，合理选择全断面帷幕灌浆、周边帷幕灌浆、局部帷幕灌浆等型式。各类型式帷幕灌浆的适用条件参见表 2。

1. 各类型式帷幕灌浆的适用条件

| 灌浆型式 | 地层情况 | 钻孔最大出水量(m3/h) | 水压力(MPa) | 水中泥砂含量(kg/m3) |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 全断面帷幕灌浆 | 水工隧洞开挖面及周边围岩无法自稳 | ≥20 | ≥0.3 | ≥100 |
| 周边帷幕灌浆 | 周边围岩稳定性较差 | ≥10 | ≥0.2 | ≥10 |
| 局部帷幕灌浆 | 局部稳定性差或水量大 | ＞1.0 | ＞0.05 | ≥0.1 |

全断面帷幕灌浆、周边帷幕灌浆、局部帷幕灌浆的帷幕灌浆圈厚度宜为水工隧洞开挖线以外3 m～8 m，当外水压力大、围岩稳定性差时选大值，并可根据帷幕灌浆实施情况对帷幕圈厚度进行动态调整。

帷幕灌浆圈厚度（参见图1）可根据涌水量、围岩地质条件和地下水压力等因素综合确定，计算方法包括经验公式法和理论公式法：



1. 帷幕灌浆加固范围示意图
2. 经验公式法

根据水工隧洞工程灌浆加固和堵水施工经验，可按公式（1）及公式（2）计算加固范围和帷

幕厚度：

 $B\_{1}=\left(2\~3\right)D$ ()

 $B=\frac{B\_{1}-D}{2}=\left(0.5\~1.0\right)D $ ()

式中：

$B\_{1}$—帷幕灌浆加固范围等效直径，单位为米（m）；

$B$—帷幕灌浆圈厚度，单位为米（m）；

$D$—隧洞开挖等效直径，单位为米（m）。

计算时，当水量和水压力较大时，系数取高限；当水量和水压力较小时，系数取低限。

1. 理论公式法

对于以涌水量为控制指标判断围岩稳定性的水工隧洞工程，灌浆加固圈固结体主要承受外水

压力和围岩荷载，同时考虑水头折减及固结体抗压强度等因素，按第四强度理论，即公式（3）计

算：

 $B=\frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{σ}{σ-\sqrt{3P\_{w}}}}-1\right)$ ()

式中：

$B$—灌浆加固圈厚度，单位为米（m）；

$D$—隧洞开挖等效直径，单位为米（m）；

$σ$—围岩固结体允许抗压强度，单位为兆帕（MPa）；

$P\_{w}$—最大外水压力，单位为兆帕（MPa）。

帷幕灌浆段落长度较大时，宜采用多循环灌浆。每循环长度可按10～30 m控制，相邻两循环帷幕灌浆搭接长度可按3 m～8 m设置，并宜根据地下水压力和围岩稳定性等因素进行动态调整。

* + - 1. 灌浆孔布置

浆液扩散半径宜根据地层孔隙或裂隙连通性、灌浆压力、浆液性能等因素进行分析，并结合现场试验和相关工程经验确定。浆液扩散半径的经验数值参见表 3。

1. 浆液扩散半径的经验数值 单位：m

| 项目 | 数值 |
| --- | --- |
| 中细砂层、粉质粘土 | 0.5～0.8 |
| 中粗砂、砂卵石层 | 1.0～1.5 |
| 断层破碎带 | 1.5～2.0 |

灌浆孔的布置应以相邻灌浆孔浆液扩散范围能够搭接形成交圈为原则，全断面帷幕灌浆或周边帷幕灌浆的灌浆孔布置宜呈辐射状，灌浆孔布置为一圈或数圈，内外圈按梅花形排列，局部帷幕灌浆的灌浆孔宜按矩形或伞形布置，灌浆孔间距宜为单孔浆液扩散半径的1.4～1.7倍，多排布置灌浆孔的排距不宜大于灌浆孔间距。

灌浆钻孔布设宜采用绝对坐标法，绝对坐标法钻孔布设模式如图 2 所示。设开挖面灌浆孔开孔坐标为G0 (X0，Y0)，灌浆孔终孔坐标为G (X，Y)，按公式（4）～（6）分别计算钻孔长度*l*、钻孔偏角*α*和钻孔立角*β*等钻孔设计参数。



1. 绝对坐标法钻孔布设模式

 $α=\arctan(\frac{X-X\_{0}}{L})$ ()

 $θ=arctan\frac{Y-Y\_{0}}{\sqrt{L^{2}+\left(X-X\_{0}\right)^{2}}}$ ()

 $l=\sqrt{\left(X-X\_{0}\right)^{2}+\left(Y-Y\_{0}\right)^{2}+L^{2}}$ ()

式中：

($X，Y$)—灌浆孔终孔坐标(*m*，*m*)；

($X\_{0}$，$Y\_{0}$)—灌浆孔开孔坐标(*m*，*m*)；

$L$—灌浆孔开孔与终孔沿水工隧洞轴线方向的投影长度，即单个循环帷幕灌浆段落长度；

$α$—钻孔偏角，单位为度（°）；

$θ$—钻孔立角，单位为度（°）；

$l$—灌浆钻孔长度，单位为米（m）。

灌浆孔孔径应根据地质条件、钻孔深度和灌浆工艺确定，终孔孔径一般不宜小于76 mm。

* + - 1. 浆液材料及配合比

浆液材料及浆液配合比应根据灌浆目的、工程地质与水文地质条件及施工条件等因素综合确定。

水工隧洞帷幕灌浆可使用单液水泥浆、水泥-水玻璃双液浆、改性水泥浆及化学浆液等。水工隧洞帷幕灌浆材料的选用一般遵循如下原则：

1. 粒径匹配原则：根据地层孔隙或裂隙尺寸进行选择，对于断层破碎带，宜采用普通水泥浆、普通水泥-水玻璃双液浆等水泥基灌浆材料；对于砂层地段，宜采用超细水泥浆、超细水泥-水玻璃双液浆等超细型特种灌浆材料；
2. 方案匹配原则：以围岩加固为主要目标的帷幕灌浆段落主要采用单液水泥浆；以堵水加固为主要目标的帷幕灌浆段落主要采用水泥-水玻璃双液浆或改性水泥浆液，以封堵集中渗流通道为主要目标时可选用水泥-水玻璃双液浆、改性水泥浆或化学浆液；
3. 水文匹配原则：按水文地质条件不同，在一般在地层富水性较小的条件下，可采用普通水泥浆、超细水泥浆；在高压、强富水条件下，应综合选用水泥-水玻璃双液浆、改性水泥浆、化学浆液等灌浆材料；
4. 动态调整原则：在灌浆实施过程中，宜根据实际地质条件、灌浆实施效果等，按照由粗颗粒浆液到细颗粒浆液、由单液到双液、由低浓度到高浓度的原则进行动态调整。

水泥单液浆水灰比可采用0.5～1.2，灌浆时浆液浓度应逐渐提升，可注性强的地层可直接注入浓浆液，并可在浆液中掺入适量粉煤灰、水玻璃等材料。

水泥-水玻璃双液浆所用的水泥浆液的水灰比可采用0.5～1.2，水泥浆液与水玻璃浆液的体积比应根据现场试验测得的凝胶时间、胶凝强度来确定。

改性水泥浆浆液所用水泥浆的水灰比可采用0.5～1.0，外加剂的类型及掺量可按表 1确定。应采取宜浓不宜稀的原则配制浆液，常用水泥类浆液配比参数参见表 4。

1. 常用水泥类浆液配比参数表

| 序号 | 浆液名称 | 配比参数 |
| --- | --- | --- |
| 水灰比 | 体积比 | 水玻璃浓度/°Bé |
| 1 | 普通水泥浆 | 0.5～1.2 |  |  |
| 2 | 超细水泥浆 | 0.6～1.0 |  |  |
| 3 | 改性水泥浆 | 0.5～1.0 |  |  |
| 4 | 普通水泥-水玻璃双液浆 | 0.5～1.2 | 1:1～1:0.2 | 30～35 |
| 5 | 超细水泥-水玻璃双液浆 | 0.6～1.0 | 1:1～1:0.2 | 30～35 |

灌浆时应控制浆液的初凝时间，初凝时间宜根据室内试验与现场灌浆试验进行确定。

* + - 1. 灌浆压力与灌浆量
				1. 灌浆压力宜按地下水静水压力进行估算，灌浆压力应大于静水压力，灌浆终压宜为静水压力的2.0～3.0倍，对于松散地层或裂隙较发育的围岩，帷幕灌浆压力宜取小值，其他地层帷幕灌浆压力宜取大值。

单孔灌浆量按公式（7）进行计算：

 $Q=πr^{2}na\left(1+β\right)$ ()

式中：

$Q$—灌浆孔每延米灌浆量,单位为立方米（m3）；

$r$—灌浆扩散半径，单位为米（m）；

$n$—地层孔隙率，砂层及充填型溶洞和岩溶发育带取 30％～40％，断层破碎带取 10％～20％；

$a$—地层孔隙或裂隙充填率，取 70％～80％；

$β$—浆液损失率，砂层及充填型溶洞和岩溶发育带取 10％～20％，裂隙带和断层破碎带取 5％～20％。

* + - 1. 其他

灌浆工艺可采用全孔一次性灌浆、前进式分段灌浆或后退式分段灌浆。

宜采用现浇混凝土浇筑形成止浆墙，止浆墙的厚度宜为1.0 m～3.0 m。止浆墙的厚度主要根据最大灌浆压力、隧洞断面大小和止浆墙材料强度确定，可参考如下经验公式法及工程类比法确定。

1. 经验公式法

按照止浆墙抗剪稳定性计算，止浆墙厚度按公式（8）进行计算：

 $B\_{w}=\frac{λP\_{Z}D}{4mτ\_{c}}$ ()

式中：

$B\_{w}$—止浆墙厚度,单位为米（m）；

$λ$—超载系数，一般取为1.1～1.3，单液灌浆取低值，双液灌浆取高值；

$P\_{Z}$—最大灌浆压力，单位为兆帕（MPa）；

$D$—隧洞开挖等效直径，单位为米（m）；

$m$—工作条件系数，一般取为 0.9～1.0，围岩强度高时取高值；

$τ\_{c}$—混凝土抗剪强度，单位为兆帕（MPa）。

1. 工程类比法
	1. 国内煤炭行业地下工程止浆墙厚度参照表 5 根据灌浆压力进行经验取值。
2. 国内煤炭行业地下工程止浆墙厚度经验值

| 灌浆压力(MPa) | 止浆墙厚度（m） |
| --- | --- |
| ＜2.0 | 1.0 |
| 2.0～5.0 | 1.5～2.0 |
| 5.0～7.5 | 2.5～3.0 |

* 1. 铁路工程隧洞止浆墙厚度参照表 6根据帷幕灌浆圈厚度进行经验取值。
1. 铁路工程隧洞止浆墙厚度经验值

| 参数值 | 帷幕灌浆圈厚度(m) |
| --- | --- |
| 2.0 | 3.0 | 5.0 | 8.0 |
| 平导 |  | 0.8～1.0 | 1.0～2.0 |  |
| 下导坑 | 0.5～0.8 | 0.8～1.0 |  |  |
| 正洞 |  |  | 1.5～2.0 | 2.0～3.0 |

* 1. 部分公路隧洞止浆墙厚度参见表 7。
1. 部分公路隧洞止浆墙厚度

| 隧洞名称 | 围岩特征 | 等效开挖直径（m） | 地下水压力（MPa） | 止浆墙厚度（m） |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 厦门翔安海底隧洞主线隧洞 | 全强风化花岗岩 | 14.7 | 0.5 | 5.0 |
| 厦门翔安海底隧洞服务通道 | 全强风化花岗岩 | 7.6 | 0.5 | 2.5 |
| 广西岑水高速均昌隧洞 | 全强风化花岗岩 | 12.0 | 1.0 | 2.0～3.0 |
| 广东大丰华高速公路鸿图隧洞 | 断层破碎带 | 12.0 | 4.3 | 5.0 |

施工现浇混凝土止浆墙宜采用C20以上的混凝土。

水压力高或涌水量较大，难以形成全封堵帷幕灌浆圈时，宜采用先排水后灌浆、排堵结合的方案，超前排水钻孔设计应符合下列规定：

1. 根据帷幕灌浆需求设置相应的超前排水钻孔；
2. 孔径不宜小于76 mm，钻孔深度和数量应满足排水降压要求；
3. 钻孔排水段应位于灌浆帷幕区域以外，避免对帷幕灌浆效果产生影响；
4. 当钻孔排水携带较多泥沙时，应设置反滤装置，避免长期排水在围岩内形成空腔；
5. 排水孔口应设置防突涌水保护装置。

水工隧洞通过暗河、采空区、承压水带等富水地层时，应判明地下水体位置、规模、流向、补给条件等，并制定防排水方案和防止突水突泥的安全措施。

灌浆设备应满足流量和压力可调、耐磨和抗腐蚀、工作性能稳定等要求，灌注水泥浆或改性水泥浆时宜选择单液灌浆泵或泥浆泵，灌注双液浆时应选择双液灌浆泵。灌注化学浆液应采用专用灌浆泵。

灌浆监测措施应符合SL 377 和SL 725 的规定，对于开挖跨度5 m＜B≤10 m的地下洞室，针对不同围岩类别，施工期安全监测项目和要求应符合表 8 的规定。

1. 锚喷支护工程监测项目及要求

| 围岩类别 | 锚喷支护工程监控量测项目 | 监测断面间距（m） |
| --- | --- | --- |
| Ⅲ | 收敛及拱顶沉降测量 | ≤50 |
| Ⅳ | 收敛及拱顶沉降测量 | ≤40 |
| Ⅴ | 1、收敛及拱顶沉降测量；2、多点位移计 | ≤30 |
| 断层破碎带 | 1、收敛及拱顶沉降测量；2、多点位移计 | 5～10 |
| 1. 同样适用于临时支护的施工期监测。
 |

* + 1. 地面灌浆
			1. 总体施工方法

在地面位置布置钻孔，沿水工隧洞轴线方向施工定向灌浆钻孔，岩体进行灌浆加固。根据工程特点，地面灌浆可以分为多个阶段：针对突泥突水形成的塌腔区可进行充填灌浆，为隧洞内突泥清理提供条件；针对受突泥、涌水影响，产生过水通道，预计破碎严重的软弱围岩区，可对支洞周边围岩进行挤密劈裂灌浆，对其进行超前加固。

* + - 1. 灌浆范围

地面灌浆的灌浆圈厚度宜为水工隧洞开挖线以外3 m～8 m，当外水压力大、围岩稳定性差时选大值，并可根据地面灌浆实施情况对加固圈厚度进行动态调整。

灌浆过程中，浆液的扩散半径随着岩层渗透系数、裂隙开度、灌浆压力、灌入时间的增加而增加；随着浆液浓度和黏度的增加而减少。施工时通过采用不同的灌浆方法，以及调节灌浆压力、浆液的性能和灌入量等参数来控制浆液的扩散范围。

* + - 1. 灌浆孔布置

地面灌浆钻孔采用可钻“L”形钻孔的定向钻，定向钻孔垂直地面开孔后逐步增加孔斜至钻孔轨迹与水工隧洞轴线平行，根据受灌各地层情况及岩层结构特点，选择合适的钻头和成孔工艺。

钻孔结构分为三级，钻孔由上到下分为直孔段、造斜段和灌浆段三部分。灌浆孔孔径应根据地质条件、钻孔深度和灌浆工艺确定，并根据孔径选择合适大小的套管。其中，一开孔根据地层条件确定深度；二开孔下放至被灌隧洞中轴线水平位置；三开孔径采用甩管工艺下放至二开套管下底口以上20 m附近。

充填灌浆阶段钻孔根据泥水主要存在区域或存在的塌腔区域，主要设计在支洞顶部和两帮位置；劈裂灌浆阶段钻孔根据地层情况建议设计多个灌浆钻孔，主要在支洞顶部和两帮布置钻孔，同时兼顾隧洞断面中心。

根据每个钻孔的点位及选用钻机的尺寸和摆放方向确定出钻机底盘的边界线，定出钻机灰土盘的位置。再根据泥浆泵、配电柜等设备尺寸、附属泥浆沉淀池的尺寸、导水排浆沟槽位置、施工时的操作空间要求、设备进出场的方便、钻场排水的便利等诸方面因素，综合考虑后确定出各钻场的整体平面布置。

钻孔过程中还应满足以下规定：

1. 钻孔应严格控制孔斜，如钻孔的偏斜值超过规定，必要时应采取补救措施；
2. 地面定向灌浆孔应每隔20 m～40 m测斜一次，定向钻轨迹偏差宜不超过100 cm；洞内突泥体挤密灌浆和超前固结灌浆方位角偏差值不应大于5°，孔底偏差值应小于2％；
3. 灌浆孔开孔孔位与设计孔位偏差不得大于5 cm，深度应满足设计要求，实际孔位、孔深应有记录。
	* + 1. 浆液材料及配合比

浆液材料及浆液配合比应根据灌浆目的、工程地质与水文地质条件及施工条件等因素综合确定。

地面灌浆可使用单液水泥浆、黏土水泥浆、改性水泥浆等。充填灌浆阶段灌浆材料宜选择改性单液水泥浆液（速凝早强型、高强型、遇水不分散型三种）或黏土水泥浆，宜选取水灰比为0.6:1～1.2:1。灌浆劈裂挤密灌浆阶段灌浆材料宜选择改性单液水泥浆液(早强型、速凝早强型）。

灌浆时应控制浆液的初凝时间，初凝时间宜根据室内试验与现场灌浆试验进行确定。

* + - 1. 灌浆压力与灌浆量

灌浆压力应具体根据围岩地质条件、水工隧洞所处地层地应力及外水压力情况经现场灌浆确定，灌浆压力初值宜为0.5 MPa～1.0 MPa。

灌浆终压分为如下三个阶段：

1. 充填灌浆：主要是对支洞周边大空洞进行充填，灌浆段终压值宜为静水压力值的1～2倍；
2. 灌浆段成孔过程灌浆阶段：以成孔为目的，以定量灌浆的方式进行，暂不设定灌浆结束压力；
3. 花管劈裂挤密灌浆：主要针对支洞周边含水断层泥进行劈裂挤密。

灌浆终压宜按公式（9）进行计算：

 $P=δ+δt$ ()

式中：

$P$—劈裂压力，单位为兆帕（MPa）；

$δ$—平均水平主应力，单位为兆帕（MPa）；

$t$—抗拉强度，单位为兆帕（MPa）。

每孔的灌浆量达到设计灌浆量或灌浆压力达到设计灌浆终压时，应继续保持20 min以上后可以结束灌浆。

浆液的灌入量主要分为突泥空洞充填和隧洞围岩加固灌浆的灌浆量两部分。其中突泥空腔充填灌浆量由突泥空腔体积大小决定；隧洞围岩加固灌浆的浆液灌入量根据浆液有效径向扩散距离和灌浆段平均裂隙率决定。浆液的总灌入量按公式（10）进行计算：

 $Q=Aπ\sum\_{i=1}^{n}R\_{i}^{2}H\_{i}nβ/m$ ()

式中：

$Q$—浆液的总灌入量，单位为立方米（m3）；

$A$—浆液超扩散消耗系数；

$R$—距中心的浆液有效扩散半径，按公式（11）进行计算，单位为米（m）；

$H$—灌浆段高，单位为米（m）；

$n$—岩层平均裂隙率；

$β$—浆液填充系数；

$m$—浆液结石率。

 $R=r+L$ ()

式中：

$R$—距中心的浆液有效扩散半径，单位为米（m）；

$r$—灌浆段灌浆孔布孔半径，单位为米（m）；

$L$—浆液径向扩散距离，单位为米（m）。

* + - 1. 灌浆段高

地面灌浆选用随钻孔梯度采用下行式分段灌浆方法。灌浆段高根据含水层位置、厚度、止浆层位、浆液性能以及灌浆泵的性能等综合确定。灌浆段高可参照 GB/T 50511—2022 中表 5.4.9 的规定执行。灌浆段高拟按 30 m～50 m 控制，特殊情况下的段高不超过 80 m。破碎带等不稳定地层采用10 m～30 m小段高进行灌浆。

* + - 1. 其他

在灌浆过程中，如发现往止浆墙串浆的现象发生，立即停泵。同时采取少量多次灌浆的方式进行，采用多孔轮流灌浆的方式进行。若地面需停灌处理后进行复灌，水泥浆液初凝后，立即对钻孔进行扫孔，后续结合现场实际情况及时进行复灌。

在灌浆过程中，由于岩层或止浆塞自身原因，导致止浆效果不好发生返浆现象。孔口一旦发现返浆现象，必须立即停泵进行压水，防止埋塞的现象发生。压水后，立即起钻检查止浆塞，如止浆塞本身没有发生损坏现象，则证明所选止浆位置止浆效果较差发生返浆现象，应继续寻找塞位，保证较好止浆效果。

* 1. 施工组织
		1. 一般规定

应根据帷幕灌浆和地面灌浆设计方案、现场施工条件编制专项施工方案，并应将隧洞帷幕灌浆和地面灌浆专项施工方案内容向现场施工人员和管理人员交底。

帷幕灌浆和地面灌浆宜由具有相关经验、人员设备齐全的专业队伍施工。

隧洞帷幕灌浆和地面灌浆施工宜选择安全可靠、技术先进、经济合理的机械和设备，宜符合下列规定：

1. 与帷幕灌浆施工方法相配套，与隧洞长度、断面大小、施工工期相适应；
2. 与地面灌浆施工方案相配套，与地面情况、地质情况、隧洞长度相适应；
3. 按照帷幕灌浆和地面灌浆施工流程合理配置机械设备，提高总体效率；
4. 优先选用安全性强、污染小、噪音小的机械设备；
5. 方便维修。

隧洞帷幕灌浆和地面灌浆宜选择性能优异、质量较好、价格便宜的供货厂家，符合以下规定：

1. 应进行水泥、水玻璃等主要材料供货调研，摸清厂家产品的质量情况、生产能力、运输能力等，并以合同形式明确权责；
2. 根据工程进度计划，提前编制各种施工材料的季、月、周需求计划，提前与供应商沟通协商；
3. 根据现场材料的使用情况，每天更新材料使用量、储存量等信息，及时上报材料采购计划，做好材料进、出库动态管理。

应建立健全隧洞帷幕灌浆与地面灌浆施工安全控制体系。

应建立健全隧洞地面灌浆施工安全控制体系。

* + 1. 施工准备

隧洞帷幕灌浆施工前应完成下列准备工作：

1. 平整场地、设置废浆池及废渣堆放地点，布置材料堆放场地，并采取材料防护措施；
2. 施作钻孔、灌浆作业平台；
3. 清理隧洞排水沟，对于反坡开挖隧洞，应配备足够的排水设备；
4. 根据监控量测数据，加强作业场所围岩支护；
5. 安装调试施工机械和设备；
6. 完成安全技术交底。

地面灌浆施工前应完成下列准备工作：

1. 确定需要进行地面灌浆的区域，并进行测量和标记；
2. 清理施工区域，包括清楚杂物、植物和其他障碍物，布置材料堆放场地，并采取材料防护措施；
3. 准备所需要的施工设备，并根据施工要求和施工材料性能，进行试验和调整；
4. 时刻监控量测隧洞衬砌结构和地表变形，实时调整灌浆方案，加强作业场所支护；
5. 在灌浆附近布置无水处理设施，施工废水、废浆均采用管路直接排至污水处理池，
6. 完成安全技术交底。
	* 1. 止浆墙施工

止浆墙施工可按照如下流程实施：

1. 确定止浆墙施作位置；
2. 根据止浆墙施作型式要求，开挖出相应的断面型式，并施作设计所采取的加固技术措施（如径向锚杆、管桩等)；
3. 采用排水管引排出开挖面附近涌水，采用抽水泵抽排出止浆墙里程段的积水；
4. 清理止浆墙施作位置的杂物；
5. 根据止浆墙设计厚度进行立模，若采用预埋型孔口管，按照设计参数将孔口管进行定位固定，立模应牢固，不变形；
6. 浇筑混凝土并振捣密实；
7. 待混凝土强度达到设计强度的80％以后方可进行钻孔灌浆施工；
8. 若采用后装型孔口管，待止浆墙强度达到设计强度的80％以后，进行钻孔安装。

止浆墙达到设计强度的80％以后，应采用灌浆方法进行渗漏检验，对漏浆位置进行密封加固。

* + 1. 钻孔
			1. 隧洞帷幕灌浆钻孔施工流程及要求

应根据隧洞地质条件、施工环境及帷幕灌浆设计要求选择合适的钻机，宜选用定位快捷、钻孔效率高、自动化程度高的全液压履带式钻机。

钻孔设备应按相应说明书或有关技术资料使用和维护保养，保证钻孔设备处于良好工作状态，钻机安装平稳牢固，钻杆中心线与设计灌浆孔中心线相吻合。

施工前应进行钻孔测放，孔位测放误差不应大于3 cm。

钻孔开孔孔径应根据地层实际情况确定，终孔孔径不应小于设计孔径。

灌浆钻孔应按设计要求分序施工。

根据岩性特点、施工安全性，灌浆段可选用清水回转钻进、风动冲击钻进或冲击回转转进。

钻孔孔深、孔径、倾角应符合设计文件要求，考虑沉渣影响，钻孔孔深应超过设计孔深，超钻不宜小于0.5 m，终孔后应有孔深验证记录。《钻孔钻探记录表》格式参见附录 A。

钻孔过程中应及时准确填写钻孔施工记录表。《钻孔施工记录表》格式参见附录 B。

钻孔过程中发生孔内事故时，应及时进行处理，并记录处理方法和结果。

* + - 1. 地面灌浆钻孔施工流程及要求

根据隧洞地质赋存条件和地表施工方案选择钻进速度快、钻孔孔壁完整性较好、钻进精度高的钻机设备，根据受灌地层情况及岩层结构特点，选择合适的钻头和成孔工艺。

应编制定向钻轨迹设计和钻孔布置专项设计。

钻孔应严格控制孔斜，如钻孔的偏斜值超过规定，必要时应采取补救措施。

应每隔20 m～40 m测斜一次，定向钻轨迹偏差宜不超过100 cm。

钻探施工采用复合钻进和无线随钻测斜定向钻进技术施工钻孔，加快钻探施工进度，提高钻孔轨迹控制精度。

采用泥浆脉冲式无线随钻测斜仪进行测斜工作。

钻孔过程中应进行记录，遇地层变化、塌孔、掉钻、失水等异常情况时，应做好详细记录。

灌浆孔(段)在钻进结束后，应捞除孔内残留物，冲净岩粉、岩屑，孔底沉淀厚度不超过 20 cm。

当钻孔施工作业暂时中止时，孔口应妥加保护，防止流进污水和落入异物。

* + 1. 制浆

应根据浆液类型选择合适的制浆设备。所选择的设备性能应与灌浆速率、浆液性能和灌浆方式相适应，应能安全、稳定、均匀、连续制浆。

制浆材料应按规定的浆液配比计量，水泥等固相材料宜采用重量称量法计量，允许偏差为±3％；水和添加剂可按体积进行计量，允许偏差为±1％。

灌浆量大的帷幕灌浆和地面灌浆工程宜在洞外或洞内建立自动化集中制浆站，其制浆能力应满足灌浆高峰期所有机组的用浆需要，并应配备防尘、除尘设施。

集中制备水泥浆时，宜制备水灰比为0.5的水泥浆，且输送水泥浆的管道流速宜为1.4 m/s～2.0 m/s。灌浆前，应根据灌浆浆液设计配比对集中制备的水泥浆的水灰比进行调配。

水泥浆液拌制过程中，应先放水，再放水泥。

水泥浆液的拌制时间，使用高速制浆机时不应小于30 s，使用普通搅拌机时不应小于3 min。

搅拌完成的浆液应经过滤后才能放入贮浆桶中，浆液在贮浆桶中应进行二次搅拌，并边搅拌边灌浆。

水泥-水玻璃双液灌浆浆液在使用前应过滤。

水泥-水玻璃双液浆应保持在5 ℃～40 ℃之间；用热水搅拌制备水泥-水玻璃双液浆时，拌合水的温度不宜超过40 ℃。

改性水泥浆液可分别制备普通硅酸盐水泥浆液和复合外加剂溶液，并按照相应的体积比例混合均匀。

浆液自制备至用完的时间不应超过其初凝时间，停放超过4 h的浆液不宜使用。

化学灌浆材料宜采用专业厂家生产的产（成）品。如购买原料现场自行配制，应对所配制的灌浆浆液进行性能测试，各项性能指标应符合设计要求。

应定期保养搅拌和计量设备，及时清除搅拌桶、搅拌池、贮浆池中的残留物和杂物，保持搅拌系统的清洁。

* + 1. 洞内帷幕灌浆过程

灌浆设备应满足流量和压力可调、耐磨和抗腐蚀、工作性能稳定等要求，灌注水泥浆或改性水泥浆时宜选择单液灌浆泵或泥浆泵，灌注双液浆时应选择双液灌浆泵。灌注化学浆液应采用专用灌浆泵。

灌浆前应检查灌浆管路及连接件、孔口管、止浆塞等，并进行试压。

单液灌浆时，灌浆泵额定工作压力不应小于设计最大灌浆压力的1.5倍；双液灌浆不应小于设计最大灌浆压力的2.0倍；灌浆压力波动范围宜小于灌浆压力的20％。

灌浆管路应保证浆液流动畅通，并能承受1.5倍的最大灌浆压力。

灌浆管路配套阀门应采用耐蚀、耐磨、耐高压的高强度材质阀门。

灌浆压力表的最大量程不应小于最大灌浆压力的2.0倍。

灌浆记录仪应能自动测量记录灌浆压力、灌浆流量、浆液密度。

全孔一次性灌浆工艺可按图 3的流程实施。



1. 全孔一次性灌浆工艺流程图
	* + 1. 前进式分段灌浆工艺可按图4的流程实施。



1. 前进式分段灌浆工艺流程图
	* + 1. 后退式分段灌浆工艺可按图 5的流程实施。



1. 后退式分段灌浆工艺流程图

灌浆宜按照从外圈向内圈的顺序作业。地层内有地下水流动时，宜从上游到下游灌浆。

当灌浆过程出现漏浆、串浆、压力上升缓慢或压力上升过快等情况时，应及时查明原因，并采取相应的处理措施：

1. 漏浆原因分析及处理对策参见表 9。
2. 漏浆原因分析及处理对策

| 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 | 灌浆前应施作止浆墙，防止开挖面出现漏浆 |
| 未对开挖面后部已开挖初期支护区域进行径向灌浆加固处理，使浆液后返 | 灌浆前应对后部靠近开挖面的已开挖支护区域进行径向灌浆，防止浆液后返 |
| 2 | 操作问题 | 止浆墙施工质量差 | 1、加强止浆墙施作质量；2、出现跑浆时，可采用双液浆，或掺加早强速凝剂，缩短浆液凝胶时间，并采取间歇灌浆措施，迅速对接触缝进行封堵 |
| 后部径向灌浆效果差 | 加强后部径向灌浆质量，降低围岩渗透性，封堵围岩与支护结构接触界面渗漏通道 |

1. 串浆原因分析及处理对策参见表 10。
2. 串浆原因分析及处理对策

| 序号 | 原因分类 | 原因分析 | 处理对策 |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 材料问题 | 浆液浓度过稀 | 调整浆液配比，增大浆液浓度 |
| 灌浆材料不合适 | 将单液浆调整为双液浆，或掺加早强速凝剂，缩短浆液凝胶时间 |
| 2 | 工艺问题 | 单孔灌浆量过大 | 按定量灌浆进行控制，必要时可对多个灌浆孔同时进行灌浆 |
| 灌浆压力过大、灌浆速率过高 | 调整灌浆参数，降低灌浆压力与灌浆流量 |
| 钻孔间距离过小 | 钻孔跳孔施工，分序次灌浆 |

1. 灌浆压力上升缓慢原因分析及处理对策参见表 11。
2. 灌浆压力上升缓慢原因分析及处理对策

| 序号 | 原因分类 | 原因分析 | 处理对策 |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 材料问题 | 浆液浓度过稀 | 调整浆液配比，增大浆液浓度 |
| 灌浆材料不合适 | 将单液浆调整为双液浆，或掺加早强速凝剂，缩短浆液凝胶时间 |
| 2 | 工艺问题 | 未设计灌浆材料复合使用体系 | 完善灌浆材料使用体系，及时进行材料类型与配比的调整 |
| 灌浆方式控制不合理 | 1. 采取间歇灌浆；
2. 采取分序灌浆，前序孔采用定量控制为主
 |
| 灌浆顺序不合理 | 遵循约束发散灌浆原则，外部堵水约束灌浆孔先施工 |
| 3 | 地质问题 | 地下水流速大，浆液被冲刷稀释 | 采取排堵结合方案，在帷幕圈前端钻设泄水孔，控制引排；采用抗动水冲刷的灌浆材料 |

1. 灌浆压力上升过快原因分析及处理对策参见表 12。
2. 灌浆压力上升过快原因分析及处理对策

| 序号 | 原因分类 | 原因分析 | 处理对策 |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 材料问题 | 浆液浓度过稀 | 调整浆液配比，增大浆液浓度 |
| 灌浆材料不合适 | 将单液浆调整为双液浆，或掺加早强速凝剂，缩短浆液凝胶时间 |
| 2 | 工艺问题 | 未设计灌浆材料复合使用体系 | 完善灌浆材料使用体系，及时进行材料类型与配比的调整 |
| 灌浆方式控制不合理 | 1. 采取间歇灌浆；
2. 采取分序灌浆，前序孔采用定量控制为主
 |
| 灌浆顺序不合理 | 遵循约束发散灌浆原则，外部堵水约束灌浆孔先施工 |
| 3 | 地质问题 | 地下水流速大，浆液被冲刷稀释 | 采取排堵结合方案，在帷幕圈前端钻设泄水孔，控制引排；采用抗动水冲刷的灌浆材料 |

灌浆因故中断时，应采取下列措施进行处理：

1. 当注入水泥-水玻璃等速凝浆液时，应及时用清水冲洗管路系统；
2. 当水泥浆中断时间超过30 min时，应冲洗灌浆孔，当冲洗无效果时，应进行重新钻孔清孔；
3. 双液浆灌浆结束时应先停水玻璃泵，后停水泥浆泵；
4. 水泥-水玻璃双液灌浆及化学灌浆施工应符合JGJ/T 211和 DL/T 5148 的有关规定。

灌浆结束标准宜符合下列规定：

1. 单孔灌浆结束：
	1. 当采用定量灌浆时，单孔灌浆量达到设计灌浆量，或灌浆终压达到设计终压，且灌浆流量小于10 L/min 时；
	2. 采用定量-定压相结合灌浆时，前序孔应达到设计的单孔单段灌浆量的1.2～1.5倍，后序孔应达到设计终压，灌浆流量小于10 L/min 时；
2. 帷幕灌浆循环结束：所有灌浆孔均达到单孔灌浆结束标准，且无漏注钻孔，灌浆效果达到设计标准，即可结束该帷幕灌浆循环。

灌浆过程中应及时、准确填写《灌浆施工记录表》，格式参见附录 C。

* + 1. 地面灌浆过程

地层空腔区充填灌浆宜采用添加合适外加剂的0.6:1～1:1纯水泥浆为主。

地层空腔区空腔和基岩裂缝劈裂挤密灌浆采用纯水泥浆或适当添加外加剂的水泥浆进行灌注。普通水泥浆灌注效果不理想时，可采用超细水泥浆灌注。

大漏量且地下水流速较大的孔段可采用水泥-水玻璃双液浆、膏状浆液灌注也可采用经试验验证可行的其它速凝浆液灌注。

灌浆可采用自上而下(前进式)分段灌浆，也可采用自下而上(后退式)分段灌浆，段长可根据地层及定向钻孔需要确定，一般采用5 m～20 m，最大段长宜不大于25 m。

灌浆过程中应适当控制灌浆压力，以防止对基岩裂隙、充填灌浆结石体的有害劈裂和既有隧洞衬护结构产生破坏。

在灌浆过程中，如发现往止浆墙串浆的现象发生，立即停泵。同时采取少量多次灌浆的方式进行。采用多孔轮流灌浆的方式进行。

在灌浆过程中，由于岩层或止浆塞自身原因，导致止浆效果不好发生返浆现象。孔口一旦发现返浆现象，必须立即停泵进行压水，防止埋塞的现象发生。

* + 1. 帷幕灌浆过程监测

帷幕灌浆过程监测应包括灌浆压力、灌浆流量、浆液配比等参数，宜采用灌浆记录仪进行全过程、自动化监测与记录。

灌浆记录仪应能够实时自动连续测量、显示、记录单孔或多孔灌浆作业的灌浆压力、灌浆流量、灌浆时间、灌浆总量，必要时可增加检测记录浆液密度等。

灌浆记录仪对灌浆参数的采样频率不宜少于1次/min。

帷幕灌浆施工过程中应记录所有钻孔揭露的地质条件，并应对钻孔的涌水量、涌水位置、水压力、钻孔异常信息等进行测试记录。

* + 1. 地面灌浆过程监测

地面灌浆拟采用计算机全自动控制技术进行浆液配置，并设置现场实验室，试验员随时检测记录原浆密度、析水率、塑性强度等性能指标。

拟采用灌浆自动记录仪对灌浆压力和流量进行观测和记录，在每次灌浆前对自动记录仪进行了校正，保证了数据采集精度。

灌浆期间在隧洞内止浆墙附近设置变形监测和隧洞收敛监测，底板设置一个抬动仪，按相关监测要求进行监测。

* + 1. 隧洞结构及周边环境监测

帷幕灌浆和地面灌浆过程中应重点监测隧洞支护结构拱顶沉降、水平收敛等变形情况，以及支护结构受力情况。监测方法与监测频率应符合《公路隧洞施工技术规范》（JTG/T 3660）的有关规定，并根据现场帷幕灌浆和地面灌浆施工工艺和参数调整监测方案，可适当加密监测断面与频率。

帷幕灌浆和地面灌浆过程中应对影响范围内的地表变形、地下水位、建筑物变形、管线变形等周边环境进行监测。

* 1. 质量检测与效果评价
		1. 一般规定

富水软弱地层洞内帷幕灌浆完成后，为判断灌浆效果是否达到设计要求，及时发现围岩薄弱区域，消除安全隐患，为后续隧洞开挖提供依据和指导，通常采用检查孔法、压水试验法、资料分析法、物探法、钻孔电视等多种质量检测方法，相互印证和补充，对灌浆后围岩的整体稳定性进行评价。此外，对于灌浆效果未达到设计要求的，需进行补孔灌浆，灌浆结束后仍需开展质量检测，直至达到设计要求。

每循环帷幕灌浆完成后，应对帷幕灌浆质量进行检测评定。

帷幕灌浆质量检测内容应包括隧洞帷幕灌浆段落的涌水量、围岩强度及稳定性等。

帷幕灌浆质量检测宜采用检查孔为主，辅以灌浆试验、物探检测、资料分析等方法。

每循环帷幕灌浆质量应整理形成检测报告，应包括检测内容、检测方法、检测数据、检测结论、建议开挖长度及灌浆工艺优化建议等。

* + 1. 检查孔法

检查孔的数量不少于灌浆钻孔总数的5％布置，且不宜少于5个。

检查孔应布置于下列部位：

1. 设计灌浆帷幕圈范围内；
2. 钻孔过程中钻孔内涌水量大、塌孔严重等不利条件存在部位；
3. 灌浆过程中灌浆量大、灌浆压力升高缓慢等部位；
4. 隧洞拱顶等高风险区域；
5. 其它可能影响整体帷幕灌浆效果的部位。

检查孔钻设深度以小于帷幕灌浆钻孔最大深度1.0 m，并以不钻穿设计灌浆圈为宜。

检查孔宜设计为取芯钻孔，观察浆液扩散充填情况，并做好钻孔取芯记录，所取芯样宜开展物理力学参数测试。

宜采用跨孔CT、钻孔电视、声波检测等方法观察检查孔的完整性，检查内容包括涌水、涌砂、涌泥以及孔壁稳定性。

检查孔涌水量应符合设计要求，在设计无明确要求时，地层严重破碎地段检查孔涌水量宜小于0.2 L/(min·m)，且单点涌水量小于10 L/min；在一般地段检查孔涌水量宜小于0.5 L/(min·m)，且单点涌水量小于10 L/min。

检查孔检查质量不合格部位，除应进行检查孔补充灌浆外，还应具体分析所在部位情况，必要时应进行补充钻孔和灌浆处理。

检查孔检查合格后，应进行灌浆封孔处理。

* + 1. 灌浆试验法

应利用检查孔开展灌浆试验检测，灌浆试验应记录灌浆压力（P）、灌浆流量（Q）随时间（t）变化规律，绘制P-Q-t曲线，根据地质特征、灌浆浆液性能、灌浆参数等对P-Q-t曲线进行分析，从而评判灌浆效果。典型的检查孔灌浆P-Q-t曲线参见图 6。



1. 典型的检查孔灌浆P-Q-t曲线

应采用灌浆记录仪对检查孔灌浆过程中的灌浆压力、灌浆流量等参数进行自动测量记录，灌浆记录仪技术性能和安装使用应符合 DL/T 5237 的有关规定。

应将灌浆试验法获得的P-Q-t曲线与帷幕灌浆实施过程的P-Q-t曲线进行对比分析。

* + 1. 物探法

宜在帷幕灌浆施工前和施工后分别对隧洞开挖面前方地层进行物探检测。

地层含水情况检测宜采用瞬变电磁法探测。

地层密实情况（或完整性）检测宜采用地质雷达法探测。

* + 1. 资料分析法

应对帷幕灌浆过程中的灌浆流量、灌浆压力等资料进行汇总分析。

应将各灌浆孔灌浆流量按灌浆顺序进行排列，绘制得到灌浆量分布时间效应图，以分析灌浆量随时间变化的情况。

应将各灌浆孔灌浆流量按灌浆孔位置进行排列，绘制灌浆量分布空间效应图，以分析灌浆量随空间变化的情况。

* + 1. 帷幕灌浆质量评定

隧洞帷幕灌浆质量应以检查孔涌水量、灌浆堵水率、检查孔成孔率、灌浆P-Q-t曲线特征、浆液时空分布特征等指标进行综合评定。

检查孔应成孔完整，检查孔成孔率应达到90％以上；检查孔内不应有股状流水，不应有涌砂、涌泥、大范围塌孔等现象，检查孔放置1 h 后，也不得发生上述现象。

检查孔涌水量在严重破碎地带宜小于 0.2 L/(min·m)，且单点涌水量宜小于 10 L/min；在一般地段宜小于0.5 L/(min·m)，且单点涌水量宜小于10 L/min；灌浆堵水率应达到85％以上，且帷幕灌浆循环段落灌浆后的总涌水量不大于10 m3/h。

检查孔P-Q-t曲线中的P-t（灌浆压力-时间）曲线应较帷幕灌浆实施过程中P-t曲线的斜率大、增加速度快，更快地达到设计灌浆终压；Q-t（灌浆流量-时间）曲线应较帷幕灌浆实施过程Q-t曲线的降低速度更快，并更快降低至灌浆结束要求；灌浆5 min～10 min后，P、Q值均应达到灌浆结束要求，否则，应进行必要的补充灌浆和灌浆参数评估与优化。

对比灌浆前后的物探解译结果，灌浆后地层应较灌浆前更为密实，且地层含水量减少、含导水构造被有效充填。

灌浆效果良好时，灌浆量时间效应图应呈下降趋势，灌浆结束时，后序灌浆孔基本应达到吸不进浆的状态。灌浆量空间效应图表现为周边灌浆孔灌浆量大于中部灌浆孔灌浆量，后序灌浆孔灌浆量小于前序孔灌浆量。

* + 1. 地面灌浆质量评价

灌浆效果评价应结合钻孔灌浆过程参数分析、压水试验对比，必要时开展孔内电视、声波检测、大地电磁等物探方法综合分析。

地面预灌浆检查方法主要包括钻孔压水试验法、物探法（大地电磁检测法）。

钻孔压水试验法通常是指选用某一灌浆孔作为检查孔开展压水试验，压水试验在灌浆前后各进行1次。

物探法应在灌浆前后各进行1次。

检查孔压水试验验收通常包括钻孔透水率、压水试验段的合格率、且透水率不合格段的分布不集中。应按附录D 填写《压水试验记录表》。

检查孔需按灌浆要求进行灌浆封孔。

1. （规范性）
钻孔钻探记录表

施工单位： 监理单位： 钻孔编号：

桩 号： 记录表编号： 开孔日期：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工作项目 | 迴次进尺 | 钻具组成 | 岩心长度 | 孔内情况描述 | 备注 |
|  | 迴次 | 自（m） | 至（m） | 进尺（m） | 立轴长度（m） | 钻杆长度（m） | 岩心管长（m） | 上余（m） | 钻具总长（m） | 编号 | 长度（m） | 残留岩心（m） |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

1. （规范性）
钻孔施工记录表

施工单位： 监理单位：

桩 号： 记录表编号：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 孔号 | 钻进段次 | 钻孔日期 | 钻孔起止时间 | 钻孔深度（m） | 钻孔总计 | 扫孔情况描述 | 异常地质描述 | 注浆许可 |
| 开始（h：min） | 终止（h：min） |
|  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |

1. （规范性）
注浆施工记录表

施工单位： 监理单位：

桩 号： 记录表编号：

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 孔号 | 注浆段次 | 注浆日期 | 注浆段长度 | 注浆时间 | 注浆方量（m3） | 注浆压力(MPa） | 注浆异常情况 |
| 开始（h：min） | 终止（h：min） | 浆液类型 | 浆液配比 | 总计 |
|  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |

1. （规范性）
压水试验记录表

施工单位： 监理单位：

桩 号： 记录表编号：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 试验段号 |  | 栓塞处 | 深度（m） |  | 水温 |  | 开始试验时间 |  |
| 试验次序 |  | 高程（m） |  | 气温 |  | 结束试验时间 |  |
| 压水方法 |  | 段底处 | 深度（m） |  | 表高 |  | 总延续时间 |  |
| 栓塞规格 |  | 高程（m） |  |  |  | 试验段长（m） |  |
| 压水（S） | 观测世间 | 观测流量 |  |
| 压力阶段 | 压力表读数 | 经水柱高（m） | 全压力 | 试验时间 | 槽内水位（m） | 耗水量（L） | 每分钟耗水量 |
| 从时分 | 到时分 | 经过时间 | 自 | 到 | 下降距 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

