



T/CECS G: 1xxx-202X

中国工程建设标准化协会标准

公路隧道岩溶结晶防治技术规程

(征求意见稿)

Technical specification for karst crystallization prevention and treatment in highway tunnel

XXXX 出版社

中国工程建设标准化协会标准

公路隧道岩溶结晶防治技术规程

(征求意见稿)

Technical specification for karst crystallization prevention and treatment in highway tunnel

T/CECS G: 1xxx-202x

主编单位：中交路桥建设有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会标准

施行日期：202x年x月x日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2023 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2023]10 号）的要求，编制组经过深入调查，结合工程实践和专项研究，认真总结经验，参考国内相关标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为 8 章和 2 个附录，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、调查与结晶风险评估、设计、施工、质量检验与验收、安全与环境保护等。

本规程由中国工程建设标准化协会 XXX 专业委员会归口管理，由中交路桥建设有限公司负责具体技术内容的解释。本规程在执行过程中，如有需要修改或补充之处，请将有关资料寄送中交路桥建设有限公司（地址：XXX；邮政编码：XXX；电子邮箱：XXX），以供修订时参考。

主编单位： 中交路桥建设有限公司

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	3
3 基本规定	4
4 隧道岩溶结晶调查与风险评估	5
4.1 一般规定.....	5
4.2 隧道岩溶结晶调查.....	5
4.3 隧道岩溶结晶风险评估.....	12
5 设计	14
5.1 一般规定.....	14
5.2 机械刮削法.....	14
5.3 水力冲刷法.....	17
5.4 化学清洗法.....	21
5.5 其他处理法.....	22
5.6 附属设施设计.....	23
5.7 其他设计.....	25
6 施工	26
6.1 一般规定.....	26
6.2 机械刮削法施工.....	27
6.3 水力冲刷法施工.....	28
6.4 化学冲洗法施工.....	29
6.5 其他处理法施工.....	30
6.6 附属设施安装.....	31
6.7 施工安全.....	32
7 质量检测与验收	33

7.1 一般规定.....	33
7.2 检测方法.....	33
7.3 质量检测.....	33
7.4 验收标准.....	34
8 安全与环境保护	35
8.1 安全.....	35
8.2 环境保护.....	35
附录 A：隧道结晶类型及风险等级表	38
附录 B：原水检测项目	39

1 总则

1.0.1 为规范公路隧道岩溶结晶防治技术，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于各等级新建、改（扩）建及已建需要维护存在岩溶结晶病害的公路隧道工程。

1.0.3 公路隧道岩溶结晶防治应积极审慎地采用新技术、新材料、新设备、新工艺，做到技术先进，安全可靠，经济合理，节能环保。

1.0.4 公路隧道排水系统管道结晶防治的除应执行本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

1.0.5 公路隧道岩溶结晶防治工程应严格遵守工程质量标准和施工安全规范，确保工程质量可靠，施工安全有序，全面保障人员安全与工程质量。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 岩溶结晶 Karst crystallization

主要是一种与岩溶作用相关的地质现象，通常发生在含水的岩石中，尤其是在碳酸盐岩如石灰岩和白云岩中。岩溶作用指的是水与岩石反应，形成溶解和沉淀过程，岩溶结晶则是这些溶解和沉淀反应的结果。

2.1.2 结晶堵塞 Crystallization Blockage

一般为公路隧道排水管在物理因素和化学因素的相互促进作用下，由于结晶物质的积聚，导致流体流动受阻或完全堵塞的现象。

2.1.3 排水管堵塞程度 Drainage pipe blockage degree

排水系统堵塞程度由排水管某一横截面沉积物横截面面积的最大值，与排水管横截面面积的比值确定。

2.1.4 机械法 Mechanical method

通过将水流加压后送入冲射喷嘴，再由喷射产生的反作用力使喷嘴和胶管一起向前推进，冲刷松动排水管内壁的结晶黏附物，同时可清洗管壁，来实现清理工作的一种方法。

2.1.5 冲洗频次 Flushing frequency

在隧道排水系统维护过程中，采用机械或高压水冲刷等方式对排水系统进行清洁的操作次数。

2.1.6 物理法 Physical method

通过在排水管道中应用电、磁、声等技术和相应设备以达到物理抗垢、缓蚀、去除结晶堵塞物的一种方法。

2.1.7 化学法 Chemical method

通过在排水管道中注入溶解剂，使排水管中的结晶堵塞物与溶解剂发生化学反应，从而使结晶堵塞物逐渐溶解，以实现去除结晶堵塞物的一种方法。

2.1.8 络合法 Complexometric method

通过加入特定的化学溶剂（如络合剂或螯合剂）与钙离子（ Ca^{2+} ）等金属离子发生反应，形成稳定的、可溶性络合物的技术手段。这些络合物能够溶解在水中，从而通过排水系统被冲刷出隧道，达到清除沉积物、疏通管道的目的。

2.1.9 酸法 Acid method

通过加入酸性化学溶剂，利用酸碱中和反应原理，将难溶于水的碳酸钙（ CaCO_3 ）结晶体转化为可溶性钙离子（ Ca^{2+} ）和二氧化碳气体（ CO_2 ）的处治方式。生成的二氧化碳气体会逸出，而可溶性钙离子则随水流被冲刷出隧道，从而达到清除沉积物、疏通排水系统的目的。

2.1.10 磁处理法 Magnetic treatment method

利用磁场作用对水或液体进行处理的技术，旨在改变液体中溶解物质的物理化学性质，从而防止或减少结晶形成的处治方式。

2.1.11 超声处理法 Ultrasonic treatment method

利用超声波（频率高于 20kHz 的声波）对液体或固体介质进行处理已达到清除管道结晶及堵塞物的技术。

2.2 符号

SS—固体悬浮物（Suspended Solids）

TDS—可溶解性固体（固形）物质的总量（Total Dissolved Solids）；

BOD—生化需氧量（Biochemical Oxygen Demand）；

COD—化学需氧量（Chemical Oxygen Demand）；

3 基本规定

3.0.1 公路隧道岩溶结晶应制定防治技术方案，方案应考虑不同地形、气候、工程地质和水文地质、隧道排水方案、施工方法等因素，结合隧道规模、施工外部条件，以资源节约、安全高效和技术先进为原则进行多方案的技术经济比选，满足防治技术方案的先进性、合理性和经济性要求。

3.0.2 公路隧道结晶防治技术设计应遵守《岩溶区公路隧道技术规范》等标准的相关要求，公路隧道结晶防治技术方案应与岩溶区的防水与排水设计、施工相互协调，综合设计。

3.0.3 公路隧道结晶防治技术设计方案应包含总体部署、设计特点、施工要求、主要工艺流程及注意事项，以及相应的安全和环保等要求。

3.0.4 岩溶区公路隧道排水管沟维护工作，应贯彻“预防为主，防治结合”的方针，加强日常检查与维护，保持隧道排水管沟的正常使用状态。

4 隧道岩溶结晶调查与风险评估

4.1 一般规定

4.1.1 为确保隧道排水管沟的安全运行，应根据日常巡查、经常检查和定期检查的结果，及时确定开展专项检查工作的项目、内容及要求。

条文说明

此过程旨在全面、深入地掌握隧道排水管沟的缺损或病害情况，收集详细的资料，为后续是否实施处治以及采取何种处治措施提供科学、准确的技术依据。检查内容应涵盖排水管沟的结构完整性、功能有效性、材料老化程度等方面。

4.1.2 检查实施单位在开展工作前，应充分调阅隧道排水管沟的相关技术资料和档案，包括但不限于设计图纸、施工记录、维修记录等。

条文说明

通过现场走访调查，了解排水管沟的实际运行状况和存在的问题，编制出全面、详细、可行的检查实施方案。该方案应明确检查的目的、范围、方法、步骤、人员分工、时间安排等要素。编制完成后，需提交给隧道管养单位进行审批。经审批通过后，检查实施单位应严格按照检查实施方案开展专项检查工作，确保检查工作的有序进行。

4.2 隧道岩溶结晶调查

4.2.1 新建、改扩建隧道岩溶结晶调查应包括以下内容：

(1) 设计符合性：检查排水管沟的设计是否符合相关标准和规范，包括排水能力、材料选用、结构形式等。

(2) 设计适配性：隧道排水方案与地质、水文等环境的适配性是确保隧道施工及运营安全的关键因素。隧道排水方案的设计需要充分考虑地质条件，如地层的渗透性、岩石的裂隙发育情况以及地下水位的高低。

(3) 施工质量：通过现场观察和检测，评估排水管沟的施工质量，包括材料质量、施工工艺、接口处理等。

(4) 施工记录：施工过程中，地质条件的动态变化会直接影响施工安全和工程进度。需要对围岩状态及稳定性、地下水情况、不良地质现象、超前地质预

报数据、施工过程中的地质修正等信息进行详细记录。

(5) 运维准备：了解隧道排水管沟的运维计划和应急预案，确保在运营期能够及时发现并处理潜在问题。

4.2.2 对于运营期出现病害的隧道，其排水管沟的调查频率应根据病害的严重程度和发展趋势进行动态调整。调查内容应包括：

(1) 病害类型与程度：详细记录病害的类型、位置、范围、严重程度等信息。

(2) 病害成因分析：通过现场观察和检测，分析病害的成因，为制定处治措施提供依据。

(3) 环境变化分析：对岩溶发育、地下水水质、隧道结构受损状况等进行信息收集，为制定处置措施提供依据。

(4) 处治措施建议：根据病害情况结合环境变化分析，提出合理的处治措施建议，包括维修、加固、更换等。

(5) 跟踪监测计划：制定跟踪监测计划，定期对病害进行复查，评估处治效果。

4.2.3 调查隧道工程所处位置的地形地貌、气候条件，并进行相应的量化评价。

(1) 地形地貌：详细记录隧道工程所在区域的地形特征，包括地势起伏、山脉走向、河谷形态等；同时，分析地貌类型，如山地、丘陵、平原等。根据地形地貌的复杂程度，采用适当的量化指标进行评价，如地形坡度、地貌稳定性等。

(2) 气候条件：收集并分析隧道工程所在区域的气候数据，包括年降雨量、降雨季节分布、年平均气温、极端天气事件等。根据气候数据的统计结果，评估气候对隧道工程的影响程度，如降雨对隧道排水系统的压力、温度对隧道材料性能的影响等。

4.2.4 调查隧道工程所处位置的工程地质和水文地质，并进行相应的量化评价。

(1) 工程地质：详细勘探隧道工程所在区域的地质构造，包括岩层分布、断层发育、节理裂隙、岩溶发育等；同时，分析岩土体的物理力学性质。根据工

程地质勘探结果，采用地质力学模型进行量化评价，评估隧道工程的地质稳定性和潜在的地质灾害风险。

(2) 水文地质：调查隧道工程所在区域的水文地质条件，包括地下水位、地下水流向、含水层分布等；同时，分析地下水对隧道工程的影响。根据水文地质调查结果，采用水文地质模型进行量化评价，评估地下水对隧道工程稳定性的影响程度。

4.2.5 调查隧道工程所处的建设期，如规划期、建设期、运营期，并进行相应的量化评价。

(1) 规划期：收集并分析隧道工程规划阶段的相关资料，包括规划背景、规划目标、规划方案等。根据规划阶段的资料，评估隧道工程规划的科学性和合理性。

(2) 建设期：详细记录隧道工程建设过程中的施工记录、质量控制措施、安全事故记录等。根据建设期的施工记录和质量控制措施，评估隧道工程的施工质量和安全性。

(3) 运营期：收集并分析隧道工程运营期间的相关数据，包括隧道维护记录、交通事故记录、环境监测数据等。根据运营期的数据，评估隧道工程的运营状态和维护效果。

4.2.6 调查隧道工程的施工图设计方案，包括隧道的规模，长度，排水系统设计方案等，并进行相应的量化评价。

(1) 隧道的规模：详细记录隧道的横断面尺寸、纵断面坡度等设计参数。根据隧道的规模参数，评估隧道设计的合理性和适应性。

(2) 隧道的长度：准确测量隧道的总长度以及各段隧道的长度分布。根据隧道的长度数据，评估隧道工程的建设难度和运营成本。

(3) 排水系统设计方案：详细分析隧道排水系统的设计方案，包括排水沟的位置、尺寸、排水能力等。根据排水系统的设计方案，评估其排水效果和运行可靠性。

4.2.7 调查隧道工程所处部位的水质检测报告，并进行相应的量化评价。

(1) 路面边沟：收集并分析路面边沟的水质检测报告，包括水质成分、污

染程度等。根据水质检测报告，评估路面边沟水质的清洁度和对隧道工程的影响。

(2) 中央排水沟：收集并分析中央排水沟的水质检测报告，重点关注其排水能力和水质状况。根据水质检测报告和排水能力评估结果，评价中央排水沟的运行效果。

(3) 隧道横、纵向排水管：收集并分析隧道横、纵向排水管的水质检测报告和排水效率数据。根据水质检测报告和排水效率数据，评估隧道排水管的运行状况和维护需求。

4.2.8 调查施工单位的资质、技术能力、物质条件，并进行相应的量化评价。

(1) 单位资质：核实施工单位的营业执照、资质证书等文件，确保其具备从事隧道工程建设的合法资格。根据施工单位的资质等级和业务范围，评估其承担隧道工程建设的能力。

(2) 技术水平：考察施工单位的技术团队和技术创新能力，包括技术人员数量、技术职称、技术成果等。根据施工单位的技术水平评估结果，评价其解决隧道工程建设中技术难题的能力。

(3) 物质条件：调查施工单位的施工设备、材料供应、资金实力等物质条件。根据施工单位的物质条件评估结果，评价其保障隧道工程建设顺利进行的能力。

4.2.9 利用层次分析法对隧道结晶堵塞风险进行量化评价，综合多因素以确定隧道结晶的风险等级。主要步骤如下：建立评价指标体系、确定评价指标权重、隧道结晶风险量化评价，最后确定隧道风险等级。

(1) 建立评价指标体系

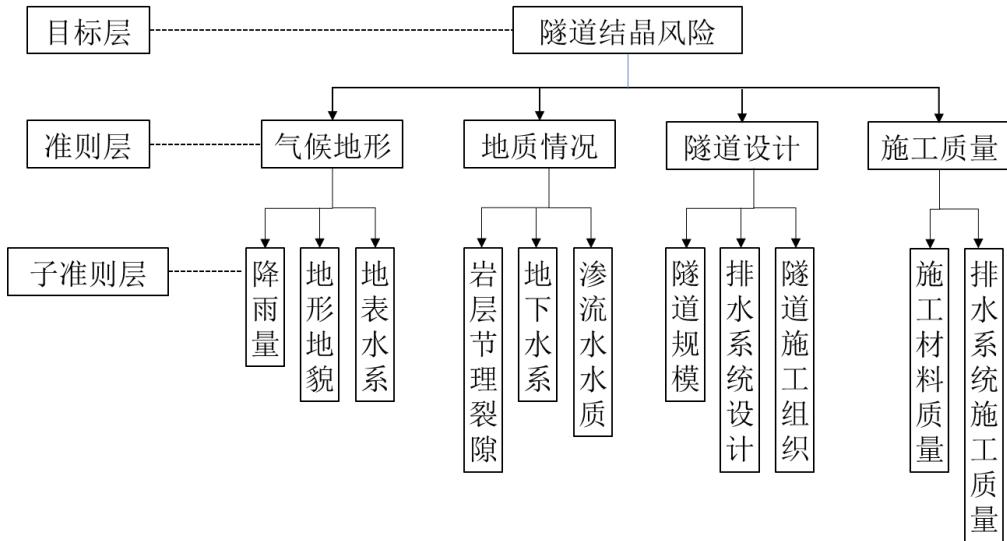


图 1.AHP 评价指标体系

(2) 确定各项指标权重

构造判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{bmatrix}$$

式中: b_{ij} 表示 i 相对 j 的相对重要性, 标度取值见下表 (表 1) :

表 1 标度取值表

标度	含义
1	前者比后者, 同样重要
3	稍微重要
5	较强重要
7	强烈重要
9	极端重要
2、4、6、8	两相邻判断的中间值
倒数	后者比前者重要标度

以准则层对目标层为例, 构造判断矩阵:

经计算, 最大特征根 $\lambda_{\max}=4.246$, 权向量为 $\omega=(0.041, 0.077, 0.569, 0.313)$ 。

一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.246 - 4}{4 - 1} = 0.082$$

$$RI = 0.89$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.082}{0.89} = 0.092$$

式中：CI 为矩阵 A 一致性指标；

RI 为平均随机一致性指标，可查表 2 得到；

n 为指标个数或矩阵 A 阶数。

CR≤0.1 故认为 A 的一致性可以被接受，A 对应的评价指标权重为（0.091, 1.291, 0.404, 1.000）

表 2 平均随机一致性指标 RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

同理，构造子准则层对准则层的判断矩阵得到权重：

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 权向量 } \omega = (0.4, 0.2, 0.4)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/3 \\ 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 权向量 } \omega = (0.105, 0.258, 0.637)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 权向量 } \omega = (0.127, 0.223, 0.650)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 \\ 5 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 权向量 } \omega = (0.167, 0.833)$$

依据调查资料采用 AHP-模糊综合评价法对隧道结晶风险等级进行打分，采用满分 10 分制对评价隧道的结晶风险影响因素进行打分，分段为优（8-10）、良（6-8）、差（3-6）、极差（1-3），经过加权平均后得到隧道风险评估打分值，根据分值确定隧道结晶风险等级。

评分规则如下：

(1) 降雨量：表示当地降雨量影响，考虑当地年降雨量及季度降雨量情况对隧道排水的影响，影响极大为极差，反之无影响则为优。

(2) 地形地貌：隧道结构所处位置的地表地貌情况的影响，若隧道结构所处地表不存在冲沟等汇水地貌则为优。

(3) 地表水系：隧道所处附近地表水系（河流、湖泊等）对隧道排水系统无影响则为优。

(4) 岩层节理裂隙：隧道结构若未通过汇水岩层节理裂隙处则为优秀。

(5) 地下水系：隧道结构附近地下水系（地下暗河、汇水溶腔等）对隧道排水无影响则为优。

(6) 渗流水水质：隧道处地下渗流水水质若 $7 < \text{pH} < 7.5$ 则为优， $7.5 < \text{pH} < 8.5$ 则为良， $8.5 < \text{pH} < 9$ 则为差， $\text{pH} > 9$ 则为极差。

(7) 隧道规模：隧道长度较长时，渗流水在隧道排水管内时间更长，更容易出现隧道排水系统堵塞风险，短隧道为优、特长隧道为良，根据隧道长度取中间值。

(8) 排水系统设计：综合排水盲管间距、横向排水管间距、各排水管（沟）尺寸进行综合打分，若满足隧道最大排水需求并且有富余则为优。

(9) 隧道施工组织：施工期对附近水源的控制、施工工艺等对隧道排水的影响等，综合对隧道进行打分。

(10) 施工材料质量：施工喷射混凝土的溶蚀，防水结构的材料耐腐蚀等方面进行打分，对隧道排水管结晶几乎无影响则为优。

(11) 排水系统施工质量：排水系统在施工后需要检测验收，包括管道堵塞、变形等，管道完整过水断面均大于 90% 则为优，管道完整过水断面均大于 75% 则为良，存在管道不完整过水断面小于 75% 则为良，管道存在完全堵塞部位则为极差。

各分项权重及子项权重依据按表 3 计算。

表3 评分明细表

项目	权重	子项目	子权重	评分
气候地形	0.041	降雨量	0.4	/
		地形地貌	0.2	/
		地表水系	0.4	/
地质情况	0.077	岩层节理裂隙	0.105	/
		地下水系	0.258	/
		渗流水水质	0.637	/
隧道设计	0.569	隧道规模	0.127	/
		排水系统设计	0.223	/
		隧道施工组织	0.650	/
施工质量	0.313	施工材料质量	0.167	/
		排水系统施工质量	0.833	/

4.3 隧道岩溶结晶风险评估

4.3.1 风险等级划分

采用满分 10 分制对评价隧道的结晶风险影响因素进行打分，打分结束后根据各项分数分别取得子权重和权重的加权平均值，分值风险等级：极低风险>9、8<低风险<9、6<中风险<8、5<高风险<6、5<极高风险。

4.3.2 隧道结晶风险评估结果应用

(1) 极高风险等级：立即停止相关工程建设或运营，采取变更排水系统结构设计方案、更换或增设高规格排水管、开展排水系统综合除晶疏通处治工作等方式降低隧道结晶风险等级。

(2) 高风险等级：应对排水系统进行立即排查，针对重点区段进行综合除晶疏通处治工作，并应用相关预防手段，防止隧道结晶堵塞风险进一步提高。

(3) 中风险等级：重视隧道结晶风险安全隐患，尽快采取相关养护措施，防治隧道结晶病害进一步恶化，必要时可采用物理法、机械法等方式处治结晶区段。

(4) 低风险等级：根据评价结果，制定针对性的预防措施，跟踪评价效果，及时调整预防措施和处治方案。

(5) 极低风险等级：依据调查结果，短期内针对结晶风险无需进行大规模投入，但应定期开展相关调查，预防结晶病害逐渐恶化。

4.3.3 隧道岩溶结晶风险调查应形成隧道岩溶结晶评估报告，评估报告内容应包括隧道的基本信息及地质背景、调查方案、风险等级评价结论以及相关防治措施及建议。

征求意见稿

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 隧道岩溶结晶防治设计应与营运防排水设施需紧密衔接，确保防水处理到位，排水系统畅通。防排水材料须合规、合格，无毒环保，且排水不得污染饮用水源。

5.1.2 根据隧道结晶风险，低风险以防为主，中高风险需防治结合。新建隧道重预防，运营隧道重治理，以制定科学合理的防排水策略。

5.1.3 岩溶结晶防治方法有机械刮削法、水力冲刷法、化学清洗法以及其他处理法。

5.2 机械刮削法

5.2.1 机械刮削系统设计

机械刮削系统主要由刮削刀具、行走机构、照明系统、摄像头监控系统等组成。

(1) 刮削刀具

在选择刮削刀具时，需根据管道内壁的材质、结晶沉积物的性质及厚度等因素进行综合考虑。常见的刮削刀具材质有合金钢、不锈钢等，具有耐磨、耐腐蚀等特性，其相关参数如下：

表 4 刀具推荐参数表

刀具类型	适用管径	功能特点	材质	应用场景
蘑菇状钻石切割刀	DN200-800 mm	切除管道内塑料、玻璃纤维、金属材质等	金刚石	市政供排水管道修复、核电厂冷却水管道修复
装夹刀具切削弯头	DN200-800 mm	清除树根、胶带和局部修复失败的残余材料	高速钢	市政供排水管道修复、社区供排水管道修复
金刚石弯头	DN200-800 mm	切除水泥注浆块、树根等硬质障碍物	金刚石	市政供排水管道修复、核电厂冷却水管道修复
盾盘组件	DN100-300 mm	清除水泥注浆块、石块、坍塌内衬管等	高强度合金钢	金属管道、混凝土管道清障
刀盘组件	DN100-300 mm	清除坍塌内衬管、树根等	高强度合金钢	金属管道、混凝土管道清障

刀具类型	适用管径	功能特点	材质	应用场景
龙卷风链组件	DN100-300 mm	清除坍塌内衬管、鳞片与沉积物	高强度合金钢	金属管道、混凝土管道清障
原始链	DN100-300 mm	清除树根、鳞片与沉积物	高强度合金钢	金属管道、混凝土管道、塑料管道清障
DC MAXI FLEX 切割头	DN100-300 mm	切割、铣削和研磨混凝土等硬沉积物	金刚石	适用于 PVC、混凝土、铸铁、钢等材质管道
涡轮切割头	DN50-200 mm	高速切割、研磨	高速钢	市政排水管道、小型管道清理
旋转铣刀	DN50-150 mm	切削硬质沉积物、水泥块	硬质合金	市政排水管道、小型管道清理
链式切割头	DN100-300 mm	切割树根、沉积物	高强度合金钢	市政排水管道、大型管道清理

(2) 行走机构

行走机构设计需考虑管道的弯曲度、坡度等因素，确保刮削刀具能够平稳、高效地行走。同时，行走机构还需具备足够的强度和刚度，以承受刮削过程中的冲击和振动，其相关参数要求如下：

1) 结构强度：在排水管疏通机器人中，每个支撑机构的设计载荷需考虑 20% 的安全余量，应采用高强度钢材或合金材料制造，确保在复杂工况下不发生变形或损坏。

2) 刚度要求：在管道清理机器人中，刚度系数的选择需确保径向摩擦力小于电机提供的驱动力，行走机构的连接部件（如弹簧管节）可采用铆钉连接，以提高整体刚度和稳定性。

3) 行走机构需具备可调节的支撑结构，以适应不同直径的排水管道。机器人可通过伸缩或变形设计适应管径范围为 $\Phi 50\text{mm}$ 至 $\Phi 1500\text{mm}$ 。

4) 对于小管径排水盲管（如 $\Phi 50\text{mm}$ ），行走机构需配备压缩弹簧自适应机构，确保在狭窄管道内无障碍作业。

5) 机器人本体的横截面轮廓尺寸应不大于最小适用管径的 $4/5$ ，且能顺利进出检查井。

6) 行走机构需具备良好的越障能力，履带式或轮式结构更适合复杂地形，能够适应坡度 $\leq 12^\circ$ 的条件。

7) 清理机器人在隧道排水管道内的行走速度通常根据管道内径、结晶层硬度以及作业需求进行调整。一般情况下，行走速度范围为 0.2m/min 至 0.5m/min。对于快速移动需求，机器人可配备快进模式，速度可达 0.5m/min。在结晶层较硬或管道内径较小的情况下，行走速度应适当降低（如 0.2m/min），以确保刮削效果和设备稳定性。在结晶层较软或管道内径较大时，行走速度可提高至 0.5m/min，以提高作业效率。

(3) 照明系统

照明系统设计需考虑照明显亮度、照明范围及照明方式等因素，确保照明效果满足操作需求，其相关参数要求如下：

- 1) 前置照明灯：无水型机器人系统：灯光强度不低于 1500 坎德拉(cd)。
带水型机器人系统：灯光强度不低于 1000 坎德拉(cd)。满水型机器人系统：
灯光强度不低于 500 坎德拉(cd)。
- 2) 后置照明灯：灯光强度不低于 500 坎德拉(cd)。
- 3) 照明灯寿命：不低于 20000 小时，且可调节灯光强度。

表 5 光源类型表

光源类型	适用条件
环形光源	适用于管道内壁的均匀照明，安装位置较高，适合较大目标的拍摄
条形光源	照明面积较大，适合较大目标的拍摄
暗场照明	适用于检测管道内壁的微小缺陷或结晶层的纹理变化
漫射照明	适用于反射性较强的表面或复杂角度的管道内壁，可减少阴影和镜面反射
同轴照明	适用于高反射表面的照明，适合检测受周围环境影响较大的物体

5.2.2 冲洗系统设计

冲洗系统用于冲洗管道内壁及刮削下来的结晶沉积物，确保清理效果。其设计需考虑冲洗范围、冲洗水量、冲洗频次等因素。

(1) 冲洗范围

冲洗范围需覆盖整个刮削区域，确保无遗漏。同时，还需考虑管道内部的弯曲度、坡度等因素，确保冲洗水流能够顺畅地流过管道内部。

(2) 冲洗水量及频次

1) 流量计算

根据隧道排水管的直径和结晶层的厚度，冲洗流量应满足将结晶层冲刷干净的要求。冲洗孔的开孔个数、孔径大小和孔间距会影响冲洗效果。冲洗孔的开孔个数与孔间距满足如下关系：

$$n=L/l$$

其中：

n 为开孔个数；

L 为管道长度；

l 为孔间距

疏通管总流量计算：

疏通管的总流量 q 与末端冲洗孔速度 v_n 、开孔个数 n 之间的关系为：

$$q=n \cdot v_n \cdot A$$

其中：

A 为冲洗孔的截面积。

2) 冲洗频次

冲洗频次需根据结晶层的严重程度和清理机器人的作业效率进行调整：

轻度结晶：对于轻度结晶的管道，建议每清理 10-15 米进行一次冲洗，以防止结晶残留物堆积。重度结晶：对于重度结晶的管道，建议每清理 5-10 米进行一次冲洗，以确保清理效果。周期性冲洗：在清理过程中，每清理 100 米或完成一个作业段后，需进行全面冲洗，以清除管道内的残留结晶。

(3) 冲洗管网系统布局

冲洗管网系统布局需考虑管道的走向、长度及管径等因素，确保冲洗水流能够顺畅地流过管道内部。同时，还需合理设置阀门等控制元件，以便对冲洗过程进行灵活控制。

5.3 水力冲刷法

5.3.1 取水系统

(1) 水源条件分析

1) 水源类型：评估可用的水源类型，如地下水、河水、湖水或再生水等，确保水源的可持续性和稳定性。

2) 取水方式：根据水源类型选择合适的取水方式，如井泵取水、管道

引水、直接抽取河水等，并考虑取水点的位置、水深、水质等因素。

①取水点的选择

取水点位置：取水点应选择在隧道排水系统中水质较好、水量充足的位
置。例如，可利用隧道内的检查井、集水池或排水泵房作为取水点。

多点取水：为保证供水的稳定性和可靠性，取水点应不少于 2 个。如果
供水条件受限，也可采用“单取水点+水池”的供水方式。

特殊水质要求：如果冲刷过程中对水质有特殊要求（如防止结晶物再次
沉积），应根据水质要求单独设置取水点或进行水质处理。

备用取水点：在条件允许的情况下，应设置备用取水点，以应对主要取
水点出现故障或水量不足的情况。

②取水距离

取水距离限制：取水点与冲刷作业点的距离应尽量缩短，以减少输水过
程中的水压损失。一般情况下，取水点应布置在作业点附近，距离不宜超过 100
米。

输水管线设计：输水管线应保证密封良好、不易损坏，并在用水点附近
设置储水设施，以备不时之需。

3) 水质情况：进行水质分析，包括浊度、悬浮物、溶解性固体、pH 值、
重金属含量等指标，确保水源满足后续水处理工艺的要求。

表 6 水质情况参数表

参数类型	参数名称	参考值	说明
化学参数	PH 值	6.5-8.5	保证水质呈中性，避免对隧道 结构和设备造成腐蚀。
重金属含量	铅、汞、镉等	不得超过国家现 行标准限值	防止重金属对排水系统和周边 环境造成污染。
悬浮物	固体悬浮物 (SS)	$\leq 100\text{mg/L}$	减少对冲刷喷头的堵塞风险。
浊度	浊度	$\leq 10\text{NTU}$	确保水质清澈，提高冲刷效率。
溶解性固体	总溶解性固体 (TDS)	$\leq 1000\text{mg/L}$	防止高溶解性固体对排水系统 造成堵塞。

(2) 水量需求确定

1) 工程规模：根据隧道排水系统的规模和预计的结晶处理量，确定所
需的水量。

2) 坡度影响: 考虑隧道坡度对水流速度和水量的影响, 确保水量足够以克服重力作用, 实现有效的冲刷。

3) 水源条件: 结合水源的可用性和稳定性, 调整水量需求, 确保在极端天气或水源波动时仍能满足冲刷需求。

(3) 取水构造物设计

1) 蓄水池: 设计合理的蓄水池容量, 以储存足够的水量, 满足连续冲刷的需求。

2) 抽水井: 对于地下水或河水取水, 设计合适的抽水井结构, 包括井深、井径、井壁材料等, 确保抽水效率和安全性。

3) 管道系统: 设计取水管道系统, 包括管道材质、管径、连接方式等, 确保水流畅通无阻, 减少水损。管径应根据设计流量和水力计算确定。对于隧道排水系统, 管径需满足冲刷所需的流量和流速要求。横向导水管的直径不宜小于 100mm, 横向坡度不应小于 2%。

5.3.2 水处理系统

(1) 工艺选择

1) 预处理: 根据水质情况, 选择合适的预处理工艺, 如格栅除污、混凝沉淀、砂滤等, 去除水中的大颗粒杂质、悬浮物和有机物。

2) 膜处理: 采用超滤、纳滤或反渗透等膜技术, 进一步去除水中的溶解性固体、微生物和重金属等污染物, 提高水质。

3) 后处理: 根据处理需求, 加入适量的除垢剂或阻垢剂, 防止水质在管道中再次结晶。

(2) 设备选型与布置

1) 预处理设备: 选择适合处理水量和水质的格栅、混凝池、沉淀池等设备, 并合理布置, 确保处理效率。

2) 膜系统: 根据水质要求和处理量, 选择合适的膜组件和膜系统配置, 如膜组件的并联或串联, 以及膜系统的清洗和再生方式。

3) 后处理设备: 设计合适的加药装置和混合器, 确保除垢剂或阻垢剂均匀加入水中。

(3) 流量计算与系统设计

1) 流量计算：根据处理水量和工艺要求，计算各处理单元的流量，确保系统设计的合理性。

2) 供水方式选择：根据水源条件和处理需求，选择合适的供水方式，如恒压供水、变频供水等。

(4) 控制系统设计

1) 自动化控制：设计自动化控制系统，实现水处理过程的远程监控和自动调节，提高处理效率和安全性。

2) 智能化监测：设置水质监测点和流量监测点，实时监测水质和处理效果，确保水质达标。

5.3.3 冲刷系统

(1) 作业范围与管网布局

1) 作业范围：根据隧道排水系统的结构和结晶分布情况，确定冲刷系统的作业范围。

2) 管网布局：设计合理的冲刷管网布局，包括管道材质、管径、连接方式等，确保冲刷水流能够覆盖整个处理区域。

(2) 水力计算与冲刷参数

1) 冲刷水量：根据冲刷需求和管道特性，计算每次冲刷所需的水量。

2) 冲刷间隔与频次：根据结晶生长速度和冲刷效果，确定冲刷间隔和频次，确保管道内壁保持清洁。

高压水射流流速和流量计算公式如下所示：

$$v_t = 44.77\sqrt{p}$$

$$q_t = 2.1d^2\sqrt{p}$$

式中： v_t ——高压水射流流速，m/s；

p ——高压水射流压力，MPa；

q_t ——高压水射流流量，L/min；

d ——喷嘴的出口直径，mm。

高压水射流喷嘴出口处的压力计算如式

$$p_0 = \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2 = \frac{1}{2} \rho_0 \delta^2 \frac{2p_i}{\rho_0} = \delta^2 p_i$$

式中：

p_0 ——喷嘴出口处的压力， MPa；

p_i ——喷嘴入口处的压力， MPa；

δ ——速度系数。

5.4 化学清洗法

5.4.1 化学冲洗法指通过在排水管道中注入溶解剂，使排水管中的结晶堵塞物与溶解剂发生化学反应，从而使结晶堵塞物逐渐溶解，以实现去除结晶堵塞物的结晶处治方法。常用的化学法主要有三类，即络合法、酸法、综合法。

5.4.2 冲洗系统设计

(1) 清洗方式选择：

根据结晶风险程度，选择浸泡清洗或循环清洗方式。浸泡清洗适用于结晶较轻的情况，通过浸泡使化学药剂充分与结晶物反应；循环清洗适用于结晶较重的情况，通过循环水流将化学药剂带入管道内部，与结晶物充分反应。

(2) 流量设计、泵选型及管道流速选择：

根据清洗方式和管道尺寸，进行流量设计。选择合适的泵型和规格，确保清洗过程中的水流量和压力满足要求。同时，合理确定管道流速，以确保化学药剂能够均匀、快速地分布在管道内部。

(3) 化学药剂选择与配置：

确保化学药剂的性能符合标准，并根据水质和结晶情况配置合适的浓度。常用的化学药剂包括酸碱溶液、阻垢剂等。在使用过程中，需要严格遵守安全操作规程，防止药剂泄漏和人员伤害。同时，化学药剂的性能应符合相应的产品标准，并在有效期内，化学药剂的浓度应根据水质进行配置。

5.4.3 废水处理系统设计：

通过沉淀、过滤、中和等工艺，去除废水中的有害物质和残留药剂，确保废水达标排放或回收利用。化学清洗法应根据结晶风险程度的不同，选择浸泡清洗和循环清洗两种不同方式，对流量进行设计并对泵进行选型，并选择管道的水流

流速。

表 7 隧道排水管化学处治清理方法

化学方法	主要成分	反应机理	效果评价
络合法	乙二胺四乙酸二钠(EDTA 二钠)、有机膦酸盐类、亚氨基二琥珀酸钠(IDS)等	螯合剂可以与钙离子形成 1:1 的络合物，通过螯合剂与钙离子的螯合反应，生成比碳酸钙更加稳定的易溶于水的络合物，促进碳酸钙结晶体中钙离子的电离，从而实现对碳酸钙的溶解	络合法不会对隧道主体结构造成损坏，且不会对环境产生严重影响，但对于硬质结晶沉淀物溶解效果差，处治效率较低
酸法	醋酸、甲酸等	主要利用酸碱中和反应原理，将难溶于水的碳酸钙结晶体通过化学反应转化为二氧化碳气体和可溶性钙离子	酸法对结晶沉淀物的溶解效果好，可以起到较好的清除隧道堵塞结晶体的作用，但酸会对隧道结构产生不利影响，需要与其他试剂联合使用
综合法	酸+络合剂+表面活性剂	酸法可将结晶体变成易溶于水的金属离子；络合剂使其与金属离子络合形成可溶性的络合物；表面活性剂可提高液体及管道内表面润滑性，降低沉淀物的附着力	综合法相较于酸法，对结晶沉淀物的溶解速率更快，可以起到很好的清除隧道堵塞结晶体的作用，但同样会对环境产生不利影响

5.5 其他处理法

5.5.1 磁处理法中布置参数的确定应包括以下内容：

(1) 明确线圈的布设方式，包括线圈的数量、位置、间距等，以确保磁场能够覆盖整个需要处理的排水系统区域。

(2) 确定电流强度，根据磁场的强度和覆盖范围进行调整，以达到最佳的防垢、除垢效果。

(3) 磁场强度的选择需要综合考虑水质、流速、管道材质等因素，通过实验或经验数据进行确定。

(2) 设备选型与安装：

1) 选择合适的磁处理设备，如永磁体或电磁体，确保其能够满足处理需求并具有良好的稳定性和安全性。

2) 按照设计要求进行设备的安装和调试，确保磁场能够正确作用于排水系统中的水流。

(3) 监测与维护：

1) 设置监测装置，定期检测磁场强度和电流强度，确保设备处于正常工作状态。

2) 定期对磁处理设备进行维护和保养，如清洁、紧固等，以延长其使用寿命并保持良好的工作状态。

5.5.2 超声处理法技术参数的确定应包括以下内容：

(1) 发生器功率的选择需要根据处理区域的大小、结晶物的种类和数量等因素进行确定。

(2) 换能器的功率和频率也需要根据实际需求进行选择，以确保超声波能够正确作用于排水系统中的水流和结晶物。

5.6 附属设施设计

5.6.1 监测及检测装置设计

(1) 监测点位布置：

1) 在隧道排水系统的关键位置布置监测点位，如排水管道的入口、出口、转弯处以及易结晶区域。

2) 监测点位应能够全面反映排水系统的运行状态和结晶情况。

(2) 监测设备选型：

1) 选择合适的监测设备，如流量计、压力计、水质分析仪等，用于实时监测排水系统的流量、压力和水质等参数。

2) 监测设备应具有高精度、稳定性和可靠性，确保监测数据的准确性。

(3) 数据采集与传输：

1) 设计数据采集系统，将监测设备采集的数据实时传输至中央控制室或远程监控平台。

2) 采用有线或无线传输方式，确保数据传输的稳定性和实时性。

(4) 数据分析与预警：

1) 建立数据分析系统，对采集到的数据进行处理和分析，识别结晶风险区域和趋势。

2) 设置预警机制，当监测数据超过预设阈值时，自动触发预警信号，提醒管理人员及时采取措施。

5.6.2 储水罐设计

(1) 储水罐容量确定:

- 1) 根据隧道排水系统的水量需求和冲洗频次，确定储水罐的容量。
- 2) 储水罐容量应能够满足冲洗系统的需求，并确保水质的稳定性。

(2) 储水罐材质选择:

- 1) 选择耐腐蚀、耐高压、易清洁的材质，如不锈钢、玻璃钢等。
- 2) 储水罐内壁应光滑，减少结晶体的附着和沉积。

(3) 储水罐布局与安装:

- 1) 储水罐应布置在便于操作和维护的位置。
- 2) 安装时应考虑储水罐的稳定性、安全性和易于清洁的因素。

5.6.3 加药装置设计

(1) 加药装置选型:

- 1) 根据处理需求和药剂类型，选择合适的加药装置，如计量泵、比例阀等。
- 2) 加药装置应具有精确的计量和稳定的输送能力。

(2) 药剂储存与配制:

- 1) 设计药剂储存区域，确保药剂的储存环境符合要求，避免受潮、变质等情况。
- 2) 设计药剂配制系统，将药剂按一定比例配制成溶液，便于加药装置输送。

(3) 加药控制:

- 1) 建立加药控制系统，根据监测数据和预设条件，自动调节加药量。
- 2) 加药控制系统应具有稳定性和可靠性，确保加药量的准确性和及时性。

5.6.4 其他附属设施设计

(1) 排水管道维护平台:

- 1) 在隧道排水管道的关键位置设计维护平台，便于管理人员进行检修和维护工作。
- 2) 维护平台应具有稳定性和安全性，确保操作人员的安全。

(2) 应急处理设施:

- 1) 设计应急处理设施, 如应急排水泵、应急储水池等, 用于应对突发事件或紧急情况。
- 2) 应急处理设施应具有快速响应和高效处理的能力。

5.7 其他设计

5.7.1 根据拟处理的隧道排水系统的实际情况, 明确拟采用的阻垢剂和除垢剂投机量, 投加频次, 投加间隔等。阻垢剂除垢剂的性能应符合相应的产品标准, 并在有效期内。

5.7.2 针对设计中的各种系统以及附属设施明确一些智能化及数字化相关设计要求, 包括取水系统、排水系统、冲刷系统智能化控制内容, 处置效果的数字化监测内容等。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 岩溶区公路隧道管养单位应根据隧道的养护等级，合理配置隧道养护资源及制订隧道排水管沟的日常巡查与经常检查计划，并根据巡查与检查结果采取必要的隧道排水管沟保养维修措施。

6.1.2 岩溶区公路隧道土建结构定期检查中应对排水管沟的状况进行检查，将排水管沟的检查结果纳入隧道土建结构的技术状况评定结果中，为隧道排水管沟的养护工作计划制订提供依据。

6.1.3 岩溶区隧道排水管沟专项检查需用专业工具深查异常区段，结合地质、设计、施工等资料全面分析病害，为处治措施提供技术依据。

6.1.4 隧道排水系统管道冲洗前的准备工作，施工时的主要施工步骤及施工要点，施工组织设计及冲洗时注意事项应根据隧道排水管沟日常巡查、经常检查、定期检查和专项检查的结果，对隧道排水管沟的病害成因、范围、程度及其发展趋势等情况进行分析评定，并综合考虑隧道的地形、地质、生态环境及运营和施工条件，合理确定处治方案。

6.1.5 应按设计的防治方法组织施工，并根据现场实际情况，制定隧道岩溶结晶防治施工方案。

6.1.6 隧道排水管沟堵塞处治施工的安全管理，应符合下列规定：

(1) 施工前应对施工风险进行分析、评估，提出防范对策，制订相应的突发事件应急预案。

(2) 施工前进行安全技术交底，对参与施工人员进行安全教育培训。

(3) 应根据公路等级、处治方案、运营情况确定交通组织方案，施工期间应设立警示和交通标志，并设专人维护、疏导交通。

(4) 施工不中断交通时，应采取下列措施：

1) 应按现行行业标准《公路养护安全作业规程》(JTGH30)的规定设置施工标志、限速标志、反光锥形交通路标和警示灯等安全设施。

2) 隧道进口端及前方适当位置，应设置公告信息牌，并应向社会发布

相关公告信息。

3) 施工应减少对公路通行的影响，并应制订交通拥堵时的疏解方案。

6.2 机械刮削法施工

6.2.1 机械刮削系统

(1) 设备组装与试运行：

1) 根据设计要求，将机械刮削设备各部件进行组装，并检查其连接是否牢固、运转是否灵活。

2) 在正式使用前，进行试运行，检查设备性能是否满足要求。

(2) 刮削作业：

1) 启动机械刮削设备，按照预设的刮削速度和行程对管道内壁进行刮削。

2) 刮削过程中应密切关注设备运转情况和刮削效果，及时调整刮削参数。

(3) 结晶物清理：

1) 刮削完成后，将管道内的结晶物清理干净，并妥善处理。

2) 对刮削设备和管道进行检查和维护，确保其处于良好状态。

6.2.2 冲洗系统施工

(1) 管道安装施工：

1) 管道安装应符合相应的施工技术标准规范的规定。

2) 安装流程包括安装准备、预制加工、干管安装、支管安装等步骤。

在安装过程中，应确保管道连接牢固、密封良好。

(2) 管道支、吊架的安装：

1) 管道支、吊架的安装应符合现行国家标准的相关规定。

2) 根据管道材质、管径及安装方式等因素，选择合适的支、吊架类型和规格。

3) 支、吊架的安装应牢固可靠，确保管道在冲洗过程中不会发生晃动或脱落。

(3) 管道连接：

1) 不同的管材、管件或阀门连接时应使用专用的转换连接件。

2) 连接过程中应确保密封性能良好，避免发生渗漏现象。

(4) 阀门安装：

1) 管道上的蝶阀、止回阀、电动阀、球阀等的安装程序包括阀门检验或试验、安装定位放线、管道下料、熔接和扣丝连接、阀门安装及固定等步骤。

2) 在安装过程中，应确保阀门的开关灵活、密封性能良好。

6.3 水力冲刷法施工

6.3.1 小型高压清洗机的性能指标应符合表 8 的规定。

表 8 小型高压清洗机主要技术指标

项目	单位	技术参数
电机功率	kW	≥2.8
电压	V	220
最大流量	L/h	≥540
额定工作压力	MPa	≥15
最大工作压力	MPa	≥17

条文说明

小型高压清洗机进行小管径排水管及排水边沟的清洗疏通，其工作原理包括高压水射流、气水脉冲等，可以对隧道纵、横、环向排水管内的淤泥和软质结晶进行有效清洗。

6.3.2 大型高压清洗车进行中央排水管（沟）的清洗疏通，其罐体容积不宜小于 $10m^3$ ，清洗泵工作压力不宜小于 25MPa。

6.3.3 取水系统施工

根据设计计算的结果，明确原水水源及水质，确定取水方式和取水构筑物所需场地大小及要求。主要包括：

- (1) 取水井的直径，深度及取水泵的设置。
- (2) 取水构筑物的尺寸、深度及施工要点。

6.3.4 水处理系统施工

- (1) 对施工区域进行实地考察，明确水处理站房的布置位置，水处理站尺

寸、荷载要求及土建施工要点。

(2) 水处理设备安装，根据施工图纸和设计要求，按水处理工艺流程安装各种水处理设备，如膜设备、后处理设备等。

(3) 水处理设备间管道连接，根据施工图纸要求，将水处理设备通过管道进行连接。

(4) 膜组件安装。

(5) 电气设备、水泵安装。

(6) 系统调试

6.3.5 冲刷系统施工同 6.2.2 节。

6.4 化学冲洗法施工

6.4.1 取水系统施工

(1) 同水力冲刷法 6.3.3 节。

(2) 化学溶剂添加设备安装

1) 位置选择：根据隧道排水系统的布局和化学冲洗的需求，选择合适的位置安装化学溶剂添加设备。确保设备易于操作、维护和检查。

2) 设备安装：按照设备制造商的说明书进行安装，确保设备固定牢固、连接紧密，避免泄漏。

3) 控制系统：安装控制系统，用于精确控制化学溶剂的添加量，确保冲洗过程中的化学浓度稳定。

(3) 搅拌均匀设施施工要求

1) 搅拌设备选择：根据冲洗溶液的体积和化学溶剂的性质，选择合适的搅拌设备，如搅拌器、泵等。

2) 搅拌设施安装：确保搅拌设备能够均匀地将化学溶剂分散到冲洗溶液中，避免局部浓度过高或过低。

3) 安全措施：在搅拌设施周围设置必要的安全防护措施，如防护栏、警示标志等，确保操作人员安全。

6.4.2 冲洗系统施工同水力冲刷法 6.2.2 节。

6.4.3 废水处理系统

(1) 位置选择：根据隧道排水系统的布局和废水处理的需求，选择合适的位置布设废水处理系统。确保系统易于操作、维护和检查。

(2) 处理工艺选择：根据废水的水质和排放标准，选择合适的废水处理工艺，如物理处理、化学处理、生物处理等。

(3) 设备安装：按照设备制造商的说明书进行废水处理设备的安装，确保设备固定牢固、连接紧密，避免泄漏。

(4) 管道连接：确保废水处理系统的管道连接紧密、无泄漏。管道材质应耐腐蚀、耐高压。

(5) 控制系统：安装控制系统，用于控制废水处理设备的启动、停止和运行参数等，确保废水处理过程的精确控制。

(6) 排放标准：废水排放应符合国家和地方环保部门的排放标准，避免对环境造成污染。

(7) 排放监测：在废水排放口设置监测装置，用于实时监测废水的排放浓度和排放量。

(8) 应急处理：制定废水排放应急处理预案，确保在废水处理系统出现故障或超标排放时能够及时采取措施进行处理。

6.5 其他处理法施工

6.5.1 磁处理法

(1) 磁除垢系统布设施工，系统布局与安装应符合相关行业标准及设计规范要求；施工流程：现场勘查与设计规划→设备材料准备→磁处理器安装位置确定→预处理与基础施工。

(2) 设备安装支架与固定，磁除垢系统中各设备的支架与固定装置的安装需遵循现行国家标准及安全规范，确保稳固可靠，防止震动与位移。

(3) 管线连接与磁路布局。系统中的进出水管、循环管等管线连接应使用符合标准的管件与连接方式，确保无泄漏；磁处理器的磁路布局需精确设计，以保证磁场覆盖范围与强度满足设计要求。

(4) 电气与控制系统安装。磁除垢系统的电气控制部分，包括电源接入、控制系统布线、传感器与执行器的安装等，应遵循电气安全规范，确保接线正确、绝缘良好，控制系统运行稳定可靠。

(5) 设置监测装置，定期检测磁场强度和电流强度，确保设备处于正常工作状态，并定期对磁处理设备进行维护和保养，如清洁、紧固等，以延长其使用寿命并保持良好的工作状态。

6.5.2 超声处理法

(1) 超声波除垢防垢系统布设施工，系统设计与安装应符合相关行业标准及设计规范的要求；施工流程：现场勘查与设计规划→设备选型与采购→安装准备→系统组件安装→调试与验收。

(2) 安装支架与固定装置，超声波除垢防垢系统中各组件（如超声波换能器、控制器等）的安装支架与固定装置应符合现行国家标准的相关规定，确保稳固可靠，防止因震动或外力作用导致设备损坏或性能下降。

(3) 系统连接与布线。超声波除垢防垢系统的连接包括设备间的物理连接与电气连接。物理连接（如管道连接、电缆连接等）应使用专用连接件或标准接口，确保连接紧密、无泄漏；电气连接（如电源线、信号线等）应按照电气安全规范进行布线，确保接线正确、绝缘良好。

(4) 超声波换能器安装与调试。超声波换能器是系统的核心组件，其安装位置、角度及与管道的距离需严格按照设计要求进行。安装完成后，需进行调试，包括频率设定、功率调整等，确保超声波能够均匀覆盖管道内壁，达到预期的除垢防垢效果。调试过程中，应使用专业仪器进行监测，确保系统性能满足设计要求。

6.6 附属设施安装

6.6.1 应在隧道排水管沟严重异常情况的重点区段和关键部位，设立长期监测点，并做好标记。

6.6.2 应在隧道洞口或洞顶设立小型气象站，对隧址区气象条件进行监测。

6.6.3 隧道排水管沟功能性监测项目宜包括：排水管沟及检查井内的水位、流量、淤积程度、水质等变化情况等。

6.6.4 宜同步开展隧道排水管沟异常区段及相邻区域隧道结构稳定性的项目如开裂、变形、渗水等关联病害发展情况的监测。

6.6.5 应采用具有自动采集、无线传输、网络存储和智能分析功能的监测仪器设备和数据采集与管理监测系统开展监测工作。

6.6.6 应综合监测数据的处理和分析结果，定期对隧道排水管沟的功能状态及病害发展趋势进行预测和预报。

6.7 施工安全

6.7.1 岩溶区公路隧道排水管沟的病害处治必须制订详实、可行、针对性强的处治实施方案，并在实施过程中应遵守国家和行业安全生产的有关法律法规。

6.7.2 建立健全安全生产管理体系，明确安全责任，严格执行安全操作规程，保证处治实施阶段的安全。

6.7.3 隧道排水管沟的病害处治中，如需破除局部路面打开中央排水管（沟）检查井，必须做好全面的安全防护措施和交通管制措施，以保证施工阶段的人员安全和交通安全。

7 质量检测与验收

7.1 一般规定

7.1.1 公路隧道结晶防治效果的质量检测与验收应严格依据本规程及相关的国家、行业标准进行。所有检测数据应真实、准确，并作为隧道结晶防治效果评估的重要依据。

7.2 检测方法

7.2.1 主要检测方法

隧道排水管道结晶防治效果的主要检测方法包括但不限于物理检测、化学分析和生物监测等。具体方法应根据实际要求、项目特点以及检测目的进行选择。

7.2.2 水质检测

(1) 进水水质检测：在隧道排水系统的进水口处进行取样，检测水质的主要指标包括浊度、pH 值、溶解氧、悬浮物、重金属离子浓度等，以评估进水水质的原始状态。

(2) 排放水水质检测：在隧道排水系统的排放口处进行取样，检测水质的主要指标包括浊度、TDS（总溶解固体）、离子浓度（如钙离子、镁离子等）、化学需氧量（COD）、生物需氧量（BOD）等，以评估处理后的水质是否达到排放标准。

(3) 回用水水质检测：对于采用回用水系统的隧道，应在回用水入口处进行取样，检测水质的主要指标与排放水水质检测相同，但应更加注重微生物指标和特定污染物的去除效果。

7.2.3 检测频率与要求

检测频率应根据隧道的使用频率、水质变化情况及防治要求确定，但不得低于每季度一次。在特殊情况下（如水质异常波动、隧道维修等），应适当增加检测频率。

7.3 质量检测

7.3.1 质量检测项目应包括进水、排水和回用水的检测频率与检测要求。具体要求如下：

(1) 进水水质检测：每季度至少检测一次，主要关注浊度、pH值、溶解氧等指标的变化情况。

(2) 排水水质检测：每月至少检测一次，重点检测浊度、TDS、离子浓度等指标，确保排水水质符合相关标准。

(3) 回用水水质检测：每月至少检测一次，除常规水质指标外，还应关注微生物指标和特定污染物的去除效果，确保回用水水质安全。

7.4 验收标准

7.4.1 施工质量验收

(1) 隧道排水系统施工完成后，应进行全面的质量检查，确保所有设备、管道、阀门等安装正确、牢固，无渗漏现象。

(2) 结晶防治设施（如化学灌浆设备、电防渗设备等）应进行功能测试，确保其正常运行并达到设计要求。

(3) 隧道排水系统的水质检测数据应满足相关标准的要求，确保排水水质达标。

7.4.2 运营工作状态验收

(1) 隧道排水系统在运营期间应定期进行维护检查，确保设备正常运行、管道畅通无阻。

(2) 定期对水质进行检测，确保排水水质持续达标。如发现水质异常波动，应立即采取措施进行处理。

(3) 对结晶防治设施进行定期维护，确保其长期稳定运行。

(4) 验收时应形成详细的验收报告，包括施工质量检查记录、水质检测报告、设备运行记录等，作为隧道结晶防治效果评估的重要依据。

8 安全与环境保护

8.1 安全

8.1.1 施工期安全规定

(1) 安全培训与教育：所有参与施工的人员，包括管理人员、技术人员和工人，在施工前必须接受全面的安全培训，掌握施工过程中的安全操作规程和应急处理措施。

(2) 个人防护装备：施工人员必须按照相关规定佩戴个人防护装备，如安全帽、安全带、防护眼镜、防护口罩等，以防止施工过程中的意外伤害。

(3) 施工安全操作规程：在施工过程中，必须严格遵守施工安全操作规程，包括但不限于施工设备的正确使用、施工材料的堆放和管理、施工区域的警示标志设置等。

(4) 安全检查与监督：施工单位应定期组织安全检查，及时发现和消除安全隐患。同时，应接受监理单位和业主单位的监督，确保施工活动的安全进行。

8.1.2 运营期设施保护安全要求

(1) 设施定期检查与维护：定期对隧道设施进行检查和维护，包括隧道结构、排水系统、照明系统、通风系统等，确保设施的正常运行。

(2) 灾害预警与应急处理：建立完善的灾害预警系统，对可能发生的灾害进行预测和预警。同时，制定应急处理预案，确保在灾害发生时能够迅速、有效地进行应急处理。

(3) 限制通行与警示标志：在隧道入口和关键位置设置警示标志，提醒驾驶员注意隧道内的安全状况。在必要时，对隧道进行限制通行，确保人员安全。

8.2 环境保护

8.2.1 环保管理规则

在公路隧道岩溶结晶防治技术的实施过程中，必须坚持“源头控制、分类收集、规范处理、达标排放”的环保管理规则，确保施工活动对环境的影响最小化。

(1) 源头控制：在施工前，应对施工区域进行环境评估，制定针对性的环保措施。在施工过程中，采用低污染、低能耗的施工设备和材料，减少施工活动对环境的污染。

(2) 分类收集：对施工过程中产生的废弃物进行分类收集，包括建筑垃圾、废水、废气等。不同类型的废弃物应采用不同的处理方式，确保废弃物的规范处理。

(3) 规范处理：对分类收集的废弃物进行规范处理。建筑垃圾应进行分类、破碎、筛分等处理，实现资源的再利用。废水和废气应经过净化处理，达到排放标准后再进行排放。

(4) 达标排放：对施工过程中产生的废水和废气进行实时监测，确保排放的废水和废气符合国家及地方的排放标准。

8.2.2 建设单位与施工单位环保责任

(1) 建设单位环保责任：建设单位应对公路隧道结晶防治技术工作的环境保护负总责。在项目策划、设计、施工和运营等各个阶段，都应充分考虑环境保护因素，制定针对性的环保措施。

(2) 施工单位环保责任：施工单位应对承包范围内的环境保护工作负责。在施工过程中，应严格遵守环保法律法规和环保管理规则，确保施工活动对环境的污染最小化。同时，应积极配合建设单位和监理单位进行环保检查和监督。

8.2.3 建筑垃圾处置原则及相关规定

(1) 建筑垃圾处置原则：建筑垃圾应进行分类、破碎、筛分等处理，实现资源的再利用。对于无法再利用的建筑垃圾，应送至指定的垃圾处理场进行处理，确保建筑垃圾不对环境造成污染。

(2) 相关规定：施工单位应制定建筑垃圾处置方案，明确建筑垃圾的分类、收集、运输和处理方式。同时，应建立建筑垃圾处置台账，记录建筑垃圾的产生量、处置方式和处置结果。

8.2.4 废水、污水排放原则及相关规定

(1) 废水、污水排放原则：废水、污水应经过净化处理，达到排放标准后再进行排放。在排放过程中，应实时监测废水和污水的排放浓度和排放量，确保排放的废水和污水符合国家及地方的排放标准。

(2) 相关规定：施工单位应建立废水、污水排放管理制度，明确废水、污水的收集、处理、排放方式和排放标准。同时，应建立废水、污水排放台账，记

录废水、污水的产生量、处理方式和排放结果。

8.2.5 环境保护工作成效评价与档案归集

(1) 环境保护工作成效评价：在项目施工过程中和结束后，应对环境保护工作的成效进行评价。评价内容包括但不限于施工活动对环境的影响、环保措施的执行情况、环保目标的实现情况等。

(2) 档案归集：在施工过程中和结束后，应建立环境保护工作档案，包括环保管理制度、环保措施执行记录、环保监测数据等。这些档案应作为项目竣工验收和环保验收的重要依据。

附录 A：隧道结晶类型及风险等级表

隧道排水系统结晶类型复杂，按其结晶淤积位置可分为中央排水沟（管）结晶、横向排水管结晶、纵向排水管结晶、边墙衬砌渗水结晶以及洞外排水沟结晶等，并可引发路面渗水隆起及衬砌击穿涌水等危险病害。由此结合隧道结晶病害典型特征，可将隧道排水系统结晶堵塞风险划分为四个等级，如附图 1 及附表 1 所示。



附图 1 隧道排水管机械处治清理方法适用性

附表 1 隧道排水系统结晶堵塞风险等级划分

风险等级	风险接受程度	风险描述
N_1 （低风险）	可接受	隧道发生排水系统结晶堵塞病害可能性较小，设计施工阶段基本无需考虑，也不需要采取相应的防治措施。
N_2 （中风险）	不可接受	隧道有发生排水系统结晶堵塞病害的可能性，设计施工阶段需要加强相关重要指标的监测，以进一步确定病害发生程度，必要时可采取一定的风险缓解措施。
N_3 （高风险）	不可接受	隧道排水系统出现结晶堵塞病害的可能性较高，对此应予以考虑，设计施工阶段应采取合适的防治措施以减轻病害发生程度，运营阶段也需保证其日常检修。
N_4 （极高风险）	不可接受	隧道排水系统极大概率会出现结晶堵塞病害，对此应予以高度重视，设计施工阶段必须采取一定的综合防控方案，运营阶段也需定期检查清理，确保排水系统正常工作。

附录 B：原水检测项目

在岩溶隧道结晶防治过程中，对取得的水样进行检测是至关重要的步骤，这有助于了解水质成分、评估结晶风险，并据此制定有效的防治措施。以下是需要开展的主要检测项目：

- 1.pH 值检测：使用 pH 计或 pH 试纸测定废水的酸碱度。
- 2.悬浮物（SS）检测：通过过滤和称重法测定废水中的悬浮物含量。
- 3.化学需氧量（COD）检测：采用重铬酸钾法或高锰酸钾法测定废水中的有机物含量。
- 4.生化需氧量（BOD）检测：通过培养微生物测定废水中的有机物含量。
- 5.重金属检测：使用原子吸收光谱法或电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）测定废水中的重金属含量。
- 6.离子浓度检测：检测水中主要离子的浓度，如钙离子（ Ca^{2+} ）、碳酸根离子（ CO_3^{2-} ）等。
- 7.其他相关检测：根据具体情况，可能还需要进行其他相关检测，如溶解氧、氨氮、硝酸盐氮等项目的检测。

综上所述，对岩溶隧道取得的水样进行上述项目的检测是防治结晶的重要步骤。通过这些检测，可以全面了解水质成分和特性，评估结晶风险，并据此制定有效的防治措施。