

# 高压旋喷桩在水库除险加固工程施工中的应用与研究

卢良席

湖北腾升工程管理有限公司 湖北 武汉 430064

**【摘要】**：随着我国大量水库运行进入中后期，病险水库除险加固成为保障水利工程安全、水资源可持续利用及区域防洪安全的关键任务。高压旋喷桩作为一种高效、灵活的地基处理与防渗加固技术，在水库除险加固工程中展现出显著优势。本文系统阐述了高压旋喷桩技术的基本原理、核心特点、施工工艺及关键参数，重点分析了其在水库坝基防渗、坝身加固、坝坡抗滑等核心场景中的应用模式、关键技术及质量控制要点，旨在为类似工程的设计、施工与质量控制提供理论依据与实践参考。

**【关键词】**：高压旋喷桩；水库除险加固；防渗加固；施工工艺

DOI:10.12417/3083-5526.25.07.014

## 1 研究背景

我国水库工程在发挥巨大效益的同时，也因历史、自然等因素积累了坝体渗漏、结构老化等病险问题，严重威胁公共安全，使得除险加固成为紧迫任务。传统方法在处理复杂地层、深部隐患等场景时常面临效率与效果局限。高压旋喷桩技术以其设备轻便、适应性强、可形成连续加固体等优势，为应对这些挑战提供了高效方案，已成为水库除险加固的关键技术之一。深入研究其应用理论与关键技术，对提升工程质量、保障工程长效安全具有重要意义。

## 2 高压旋喷桩技术核心理论与施工工艺

### 2.1 高压旋喷桩技术基本原理

高压旋喷桩（JetGrouting）基本原理是利用钻机钻孔至预定深度后，通过钻杆底端喷嘴，以高压（通常 20-40MPa 或更高）喷射出水泥浆等固化剂浆液。该高速射流可连续冲击、切割并破坏原状土体结构，使土颗粒分散剥落。与此同时，钻杆边旋转边缓慢提升，使浆液与崩落的土颗粒就地强制搅拌、混合，并发生一系列物理化学反应。最终，在地基中形成由浆液与土颗粒凝结而成的、连续、致密且强度较高的圆柱状固结体，即旋喷桩。根据喷射介质的不同，可分为单管法、双管法和三管法，以适应不同的地层条件与工程要求。

### 2.2 高压旋喷桩技术核心特点

高压旋喷桩技术核心特点包括：广泛适用性，可处理从淤泥、粘土到砂土、砂砾石乃至含少量块石的复杂地层。高度灵活性，通过调整桩位布置，既可形成独立的圆柱状加固体，也能搭接构建连续的防渗帷幕或承载墙体，满足防渗、加固、纠偏等多重需求。精准可控性，通过对喷射压力、提升与旋转速度、浆液配比等关键参数的精确调控，能够主动控制成桩直径、强度及均匀性。此外，它属于原位加固，对周围土体和邻近结构扰动小，且设备相对轻便，特别适合在水库坝顶、坝坡等空间受限的狭窄场地施工。

### 2.3 高压旋喷桩施工工艺与流程

#### 2.3.1 施工准备工作

施工准备工作是保障工程质量与顺利实施的基础，必须周密细致。核心内容包括：基于地质水文资料进行现场工艺性试桩，以确定喷射压力、提升速度等关键施工参数；依据图纸精确测量放样，标定桩位，并完成场地平整与临建布置；确保施工设备进场并完成检查、调试，保证性能可靠；对水泥、外加剂等原材料进行检验，并完成浆液配比试验；最后，向所有人员进行详细的技术与安全交底。

#### 2.3.2 核心施工工序

核心施工工序是形成旋喷桩实体的直接环节，其标准化流程始于“钻孔就位”，需精确调整钻机水平与钻杆垂直度。接着“钻孔至设计深度”，采用适宜方法成孔。最关键的是“高压喷射注浆”：钻具到达孔底后，在设定高压（通常 20-40MPa）下喷射浆液，钻杆按预定旋转速度（约 10-20r/min）和提升速度（约 5-25cm/min）匀速旋转提升，使浆液与土体充分搅拌混合，形成固结桩体。单桩完成后，立即“冲洗管路”以防堵塞，随后“移机”进行下一循环。整个过程需严格控制参数，确保成桩质量。

#### 2.3.3 施工设备与材料

高压旋喷桩施工依赖于一套专用设备系统与合格的工程材料，主要施工设备包括：高压旋喷钻机，负责钻孔、提升和旋转；高压柱塞泵，为核心动力源，提供稳定高压浆液流；自动制浆与储浆系统，用于浆液的精确配制、搅拌与存储；辅助设备如空气压缩机、灰浆搅拌机、各类管路、阀门及控制仪表等。材料方面，核心是胶凝材料，通常采用强度等级不低于 42.5 的普通硅酸盐水泥，在特殊地质时需选用相应特种水泥。拌和用水需清洁无污染。此外，常根据工程需要掺加外加剂，如速凝剂、减水剂或膨润土，以优化浆液性能，适应复杂施工条件。

### 2.4 施工参数设计与影响因素分析

施工参数设计是高压旋喷桩技术的核心，直接决定成桩直径、强度与均匀性，必须依据地质条件与试验确定。关键参数

包括：喷射压力与流量，决定土体切割能量与桩径；提升与旋转速度，影响注浆量与搅拌均匀性，需协调匹配；浆液性质，如水灰比和外加剂，调控流动性与最终强度。这些参数的效果受地层特性显著影响：在密实砂砾层需更高压力，在软弱粘土层应控制提升速度，在动水条件下需添加外加剂。因此，施工参数必须结合具体地质进行精细化动态设计与实时优化。

### 3 高压旋喷桩在水库除险加固中的应用场景与关键技术

#### 3.1 水库除险加固的核心需求的常见隐患

水库除险加固的核心目标是系统性消除安全隐患，恢复和提升工程的安全与功能。其核心需求主要源于四大类常见隐患。渗漏问题最为普遍，常发生于坝体、坝基，易引发坝后渗漏、管涌甚至渗透破坏，直接威胁坝体稳定。稳定性问题突出，包括坝坡因抗剪强度不足、水位骤降或地震作用存在滑坡风险，以及坝基软弱夹层导致的承载力与抗滑稳定性不足。结构缺陷广泛存在，如老旧土石坝填筑不均引发的裂缝与沉降，混凝土结构的开裂、碳化和止水老化。此外，大量早期水库抗震能力不足，设计标准低，坝体或地基土层存在地震液化风险。这些隐患相互关联，要求加固措施必须具备高度针对性、可靠性与综合性。

#### 3.2 高压旋喷桩在水库除险加固中的核心应用场景

##### 3.2.1 坝基防渗加固

在坝基防渗加固中，高压旋喷桩的核心作用是构建一道垂直、连续的防渗帷幕，用以截断坝基覆盖层或破碎岩体中的渗流通道。标准做法是沿坝轴线或坝肩，按设计间距布置单排或多排旋喷桩，通过精确控制施工工艺，使相邻桩体相互搭接，形成一道完整的地下防渗墙体。帷幕深度需穿透主要透水层，并深入相对不透水层一定深度，或根据渗流稳定计算采用悬挂式设计。该技术特别适用于处理砂层、砂砾石层等松散透水地基的渗漏问题，具有施工速度快、无需大开挖、对坝体扰动小等显著优势。成功应用的关键在于严格控制桩体垂直度、确保桩径均匀稳定，并保证桩间有足够的搭接厚度，从而形成无薄弱环节的可靠防渗屏障。

##### 3.2.2 坝身加固处理

高压旋喷桩应用于坝身加固，主要针对土石坝坝体内部存在的质量缺陷，如填筑不实、裂缝、松散区、动物洞穴及历史渗漏通道等。通过在坝顶或坝坡钻孔至隐患深度，实施高压喷射注浆，可在坝体内部原位形成高强度水泥土固结桩柱。这些桩体不仅能直接填充空洞与裂缝，还能挤密、加密周围坝体土料，从而有效提高坝体局部或分区的密实度、整体性和抗渗性能。对于线状裂缝或渗漏带，可布置一排搭接的旋喷桩形成一道截渗墙进行封堵。此法施工灵活、针对性强，对坝体上部结构和正常运行影响较小。实施时需特别注意评估钻孔对既有防

渗体的潜在损害风险，必要时应采用套管护壁等保护措施，并严格控制注浆压力，避免对坝体造成不必要的劈裂破坏。

#### 3.2.3 坝坡抗滑加固

在坝坡抗滑加固领域，高压旋喷桩主要作为提高边坡稳定性的土体改良和微型支挡结构。其工作原理类似于抗滑桩或抗滑键。当坝坡因土体强度不足、水位变动或地震影响存在潜在滑动风险时，可在潜在滑动面区域，按一定间距和角度施作一系列高压旋喷桩。桩体需穿过潜在滑动面，并锚入其下稳定地层足够深度，从而通过桩身自身的抗剪与抗弯强度，为滑动体提供直接阻滑力。同时，桩体与周围土体形成的复合地基也能改善坡体整体稳定性。对于更高稳定性要求，可在成桩过程中插入钢筋或型钢，形成劲性旋喷桩，以显著增强其抗剪抗弯能力。该技术具有施工灵活、对坡面开挖干扰小、可与排水等措施协同作业的优点，适用于土质及类土质边坡的加固处理。

#### 3.2.4 其他应用场景

除上述核心场景外，高压旋喷桩在水库除险加固中还有诸多重要应用。在涵洞、溢洪道等建筑物地基处理中，可用于加固其下卧的软弱土层，提高地基承载力，控制不均匀沉降。在处理穿坝建筑物与坝体填土间的接触渗漏时，可环绕建筑物外围施作旋喷桩帷幕，形成封闭的防渗圈。在应急抢险中，面对突发管涌、集中渗漏等险情，可快速采用旋喷桩结合速凝浆液进行封堵，快速形成应急防渗体。此外，该技术还可用于加固老化水工混凝土结构的基础，或对库岸滑坡堆积体进行前缘固脚和浅层加固。这些多样化应用充分体现了高压旋喷桩技术“灵活、快速、高效、适应性强”的特点，使其成为应对水库各类复杂病险问题的有效工程技术手段。

### 3.3 水库复杂地质条件下的施工关键技术

面对水库复杂地质条件，高压旋喷桩施工需采用针对性关键技术。在含大粒径孤石、漂石的深厚覆盖层，需采用冲击钻“预成孔”穿透障碍，或选用切割力更强的三管法工艺。在高地下水或动水流速较大区域，应优先采用双管或三管法，利用气流包裹浆液射流减少稀释，并必须在浆液中掺加高效速凝剂以缩短胶凝时间，必要时可结合先导孔注浆等方式临时降低水流影响。对于多层非均质地层，应根据钻探资料和实时监测反馈，实施“一层一策”的精细化施工，动态调整不同深度地层的喷射压力、提升速度及浆液配比。在陡峭坝坡或狭窄场地施工，则需选用轻型特种设备，搭建稳固作业平台，并落实浆液回收与环保措施，确保施工安全与水质保护。

### 3.4 施工过程中的质量控制要点

#### 3.4.1 施工前质量控制

施工前质量控制是保障工程成功的基石，核心在于“先试验，后施工”。必须依据详实的地质资料 and 设计要求，编制专项施工方案。其中的关键环节是现场工艺性试验，需在地质代

表性区域进行试桩，通过后续的开挖、取芯和检测，验证并最终确定适用于本地层的喷射压力、提升速度、浆液配比等核心参数。同时，要建立严格的质量控制体系，对进场的水泥、外加剂等原材料进行检验，确保质量合格；对高压泵、钻机、计量仪表等设备进行全面调试和标定，保证其性能可靠、计量准确。此外，精准的测量放样和详尽的技术、安全交底也必不可少，确保所有人员明确标准与流程，为后续施工奠定坚实基础。

### 3.4.2 施工过程质量控制

施工过程质量控制是确保成桩质量的决定性环节，必须实施全过程动态监控。其核心是对关键施工参数进行实时监测与记录，包括喷射压力、注浆流量、钻杆提升与旋转速度、浆液比重等，确保其严格符合工艺试验确定的标准，任何偏差都需及时分析与纠正。同时，工序监控不可或缺，每根桩施工前必须复核桩位，并利用测斜装置控制钻杆垂直度。孔口返浆情况是重要的过程观察指标，其颜色、成分和数量的异常往往是地层变化或工艺问题的信号，需密切监视。遇压力骤变、大量漏浆等异常，应立即停止作业，查明原因并妥善处理后方可复工。所有操作、参数及异常情况均需如实记录，形成完整、可追溯的施工档案。

### 参考文献：

- [1] 张力.某新建工程深基坑高压旋喷桩组合的止水帷幕施工技术研究[J].海峡科学,2025,(12):75-78.
- [2] 胡芝,曹立力,唐鹏,等.软弱夹层土地基高压旋喷桩加固试验与应用[J].水电与新能源,2025,39(12):28-31+55.
- [3] 刘勤华.高压旋喷桩加固技术在顶管工程中的应用[J].四川水泥,2025,(12):164-166.
- [4] 顾森华.高压旋喷桩与灌注桩在基坑止水中的应用[J].科技创新与应用,2025,15(34):149-152.
- [5] 李阳.高压旋喷桩灌浆技术在南王水库大坝除险加固中的应用[J].小水电,2024,(05):77-80.

### 3.4.3 施工后质量检测

施工后质量检测是验证高压旋喷桩工程效果的最终手段，需采用多种方法进行综合评价。直观的检查方法包括浅部开挖，直接观测桩体外观、测量桩径及检查桩间搭接情况。更为客观的定量检测是钻孔取芯与室内试验，通过对芯样进行观察，并测试其无侧限抗压强度和渗透系数，以评价桩体的完整性和物理力学性能是否满足设计要求。对于防渗工程，现场原位测试至关重要，通常采用围井注水试验或在帷幕体上钻孔进行压水/注水试验，直接测定其渗透系数，这是评价防渗帷幕有效性的核心指标。所有检测结果应综合分析，形成最终的质量评价报告。

## 4 结论与展望

高压旋喷桩技术因其适应性强、施工灵活，已成为水库除险加固中处理坝基防渗、坝体坝坡稳定等关键问题的重要手段。其应用成效取决于精准的地质把握、精细的工艺控制和全过程质量管理。展望未来，随着装备智能化、材料科学及检测技术的发展，该技术将更加高效、可靠。深化其长期性能研究与标准化建设，对推动技术进步和保障水库长效安全至关重要。