水平旋喷技术在软弱泥质粉砂岩隧道中的应用

符名一，冯乐乐
（中交一航局第一工程有限公司）

摘　要：为解决我国中西部复杂地质区隧道建设中富水软弱泥质粉砂岩断层带的注浆加固难题，依托百色北环高速公路那务隧道工程，系统开展了水平旋喷技术在强风化富水泥质粉砂岩地层中的机理研究、参数优化与工程验证。通过现场试验与实时监测相结合的方法，提出了“双环咬合桩体+径向补强+加强支护”的立体加固体系，建立了以“压力–流量–转速–提升速度”为核心的四维协同施工控制标准。工程应用表明，该技术显著改善了围岩物理力学性能，形成平均强度达 15.3 MPa 的连续加固壳体，成功将围岩变形控制在 3 mm/d 以内，有效阻隔地下水渗流，实现了复杂地质段安全、快速掘进。水平旋喷技术可为类似条件的隧道施工提供参考。

关键词：隧道工程；水平旋喷；泥质粉砂岩；断层带；参数优化；加固机理

0　引言

随着我国高速公路、铁路网络不断向地形地质条件复杂的西部地区延伸，隧道工程在路网中的占比持续攀升。在中西部地区普遍发育的泥质粉砂岩地层，因其矿物成分、胶结程度和风化程度的差异，表现出复杂的工程地质特性。特别是在全风化、强风化状态下，这类岩石强度低(单轴抗压强度常低于 5 MPa)，干燥时呈现相对致密结构，但遇水后迅速软化、崩解，自稳能力急剧下降，给隧道施工带来极大挑战[1]。常规的超前支护方法小导管注浆、管棚支护等在渗透性较好的地层中效果显著，但对于结构致密的泥质粉砂岩，浆液难以有效扩散，常形成空腔注浆或脉状注浆，加固效果有限。一旦遭遇富水断层带，极易引发掌子面失稳、初期支护大变形甚至突水突泥等地质灾害[2]。因此，研发适用于此类特殊地层的有效预加固技术，成为保障隧道施工安全的关键。

水平旋喷技术通过高压射流对围岩进行切割、搅拌并与水泥浆混合，形成水平向水泥土加固桩，具有主动改良地层、形成连续支护结构的独特优势。但在富水致密泥质粉砂岩中的成桩机理、参数优化及长期加固效果仍然需要进行深入研究。本文基于那务隧道工程，通过系统研究形成了成套的水平旋喷加固技术体系，以期为类似工程提供参考。

1　工程概况

1.1　项目概述

百色北环高速公路北环项目起于百色田阳区，止于百色市右江区，全长 52.71 km，其中那务隧道全长 2 185 m。隧道洞身穿越多处断层破碎带，Ⅳ、Ⅴ级围岩占比 83.5%，全、强风化泥质粉砂岩地层，岩石强度低，开挖前呈密实结构，掌子面暴露在空气下，受地下水影响，迅速松散、垮塌，洞渣泥化，已完成初支段围岩沉降速率较大，且无收敛趋势，开挖难度极大，施工安全风险高，是全线控制性工程。

1.2　地质特征

那务隧道在施工至 ZK48+662 里程时，掌子面揭示地质为强风化粉砂岩夹全风化泥质粉砂岩，围岩呈碎裂块状结构，薄层状特征明显，节理裂隙极为发育，岩质软硬不均，软弱夹层分布广泛。掌子面存在多处股状流水，拱顶及拱肩部位出现大面积渗水现象，全风化泥质粉砂岩遇水后迅速泥化，随水流流失。物探结果显示掌子面前方存在宽约 30 m 的富水断层带，该段围岩表现出以下三重典型特征。

1）致密性特征：未扰动岩体孔隙率较低，现场实测值为 8%~12%，渗透系数在 10^{-6} cm/s 量级，常规水泥浆液难以有效渗入。

2）软化性特征：岩石饱和单轴抗压强度仅为 0.8~1.5 MPa，遇水后强度衰减幅度超过 70%。

3）富水性特征：断层导水性强，掌子面单点最大涌水量达 50 m^3/h，水压约 0.3~0.5 MPa。

1.3　软弱泥质粉砂岩加固措施

施工至隧道泥质粉砂岩地层断层带时出现掌子面塌方，已完成初期支护拱架被压弯，超前小

导管被拔出，地下水大量流出，受地下水影响掌子面持续垮塌并不断向斜上方延伸，喷射混凝土封闭掌子面过程中仍然不断垮塌，初期采用“反压回填+帷幕注浆”方案，注浆压力达到 3~5 MPa。但开挖检查发现：仅在塌腔松散区内浆脉较为发育，固结体强度约 2~3 MPa。前方原状致密岩体中，浆液仅沿少数裂隙扩散，形成不连续脉状结构，改良范围有限。挖除反压体后，掌子面在水压和扰动下迅速失稳，表明常规注浆未能形成有效的整体加固圈。这一现象揭示了在致密软弱地层中，单纯提高注浆压力难以克服浆液渗透的物理屏障，必须采用能主动破碎、搅拌地层的机械–化学复合加固方法。

水平旋喷加固是针对上述问题的一种有效应对措施，其在泥质粉砂岩中的加固作用主要通过三重协同机制实现。首先，高压射流（速度可达 200~300 m/s）对岩体进行机械切割与置换破坏原有结构，使部分细颗粒随浆液排出，同时水泥浆液注入并占据空间；其次，钻杆旋转促使水泥浆与破碎的岩土颗粒充分搅拌混合与充填，形成均匀的水泥土复合材料；最后，在高围压环境下，浆液在射流形成的新生裂隙及原有微裂隙中产生有限的渗透与劈裂效应，进一步扩展加固范围。上述机制共同作用，将原先低强度、遇水易软化的泥质粉砂岩改良为高强度（可达到原岩强度的 10 倍以上）、低渗透性的水泥土复合体。

2　水平旋喷加固关键施工技术

2.1　加固技术设计

1）加固范围

优先在掌子面浇筑 2 m 厚止浆墙，旋喷桩钻孔长度 30 m，旋喷长度 28 m。径向加固隧道拱部全风化岩层垮塌涌水处，为隧道中线左侧 45°至中线右侧 30°范围。水平旋喷桩沿隧道轴线示意图如图 1 所示。

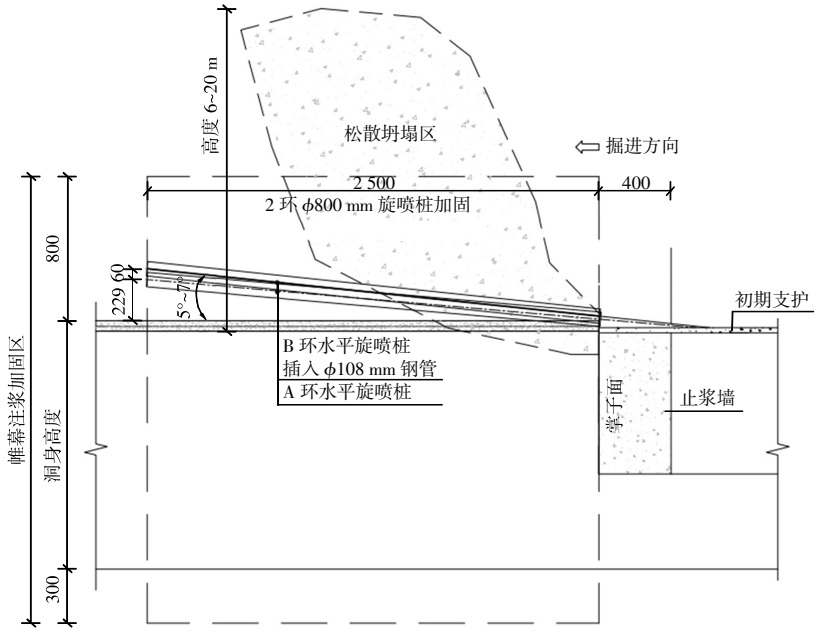
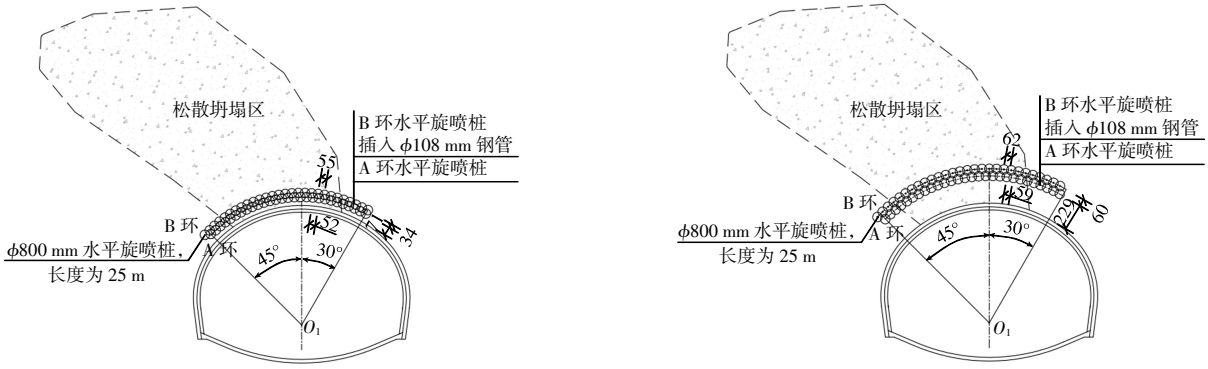


图 1　水平旋喷桩沿隧道轴线示意图（cm）

2）桩位布置

为有效控制隧道拱部涌水与突泥风险，设计采用双环 ϕ800 mm 水平旋喷桩进行超前预加固，桩长 25 m，外插角 5°~7°。共布置 2 排旋喷桩，每排 30 根，总计 60 根。外环桩开孔位于初期支护内轮廓线向内 10 cm 处，环向间距 47 cm；内环桩开孔位于初期支护内轮廓线向内 20 cm 处，环向间距 46 cm。在距离掌子面 10 m 断面处，内外排桩间距为 34 cm，外排桩间距为 55 cm，咬合 25 cm，内排桩间距为 52 cm，咬合为 28 cm；在距离掌子面 25 m 断面处，内外排桩间距为 60 cm，外排桩间距为 62 cm，咬合 18 cm，内排桩间距为 59 cm，咬合 21 cm。旋喷桩断面示意图如图 2 所示，注浆材料采用具有快硬、早强、微膨胀特性的硫铝酸盐水泥，其特性特别适用于富水环境下的加固工程。通过系统的室内试验确定水灰比为 0.5∶1 时，浆液的流动性、保水性与最终强度达到最佳平衡状态。



(a) 旋喷桩 10 m 位置断面　　(b) 旋喷桩 25 m 位置断面

图 2　旋喷桩断面示意图(cm)

2.2　工艺控制要点

1) 分段压力控制：在穿越不同地层界面时，根据返浆情况和扭矩变化，动态调整压力。在极软弱段适当降低压力防止浆液过度扩散，在致密段提高压力确保切割效果。

2) 复喷工艺应用：采用“三喷二搅”工艺，即在每根桩施工过程中，在关键部位(如桩顶、桩底及地层变化处)进行重复喷射，确保桩体均匀性和界面结合质量。

3) 信息化施工管理：配备全自动记录仪，实时采集并存储所有施工参数，建立每根桩的“电子档案”，实现质量可追溯。

2.3　施工组织优化

针对隧道内狭小空间作业的特点，创新性地采用了模块化、流水化的施工组织模式。

1) 设备布局优化：将高压泵站、制浆站、空压机等大型设备集成在可移动平台上，减少占地面积，旋喷施工场地示意图见图 3。

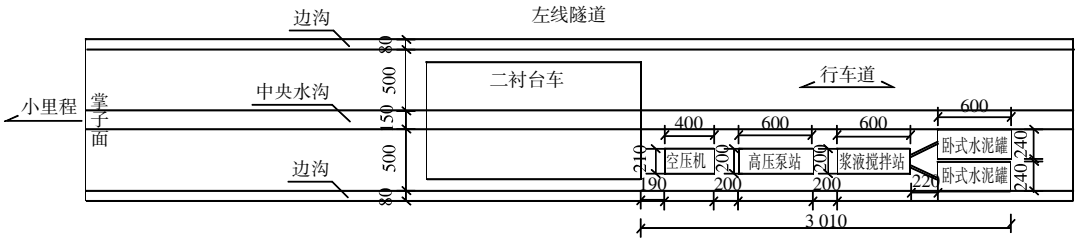


图 3　旋喷施工场地示意图(cm)

2) 工序衔接优化：采用“测量放样—钻孔—旋喷—清洗”四班制流水作业，将辅助时间压缩 30%。

3) 排污系统创新：设计三级沉淀循环系统，实现 90%以上施工废水回用，解决洞内环保难题。

2.4　施工工艺流程

水平旋喷加固施工流程遵循“先导孔控制方向、分级成孔保障通过性、旋喷成桩形成加固圈”的总体思路，水平旋喷加固施工工艺流程图如图 4 所示。

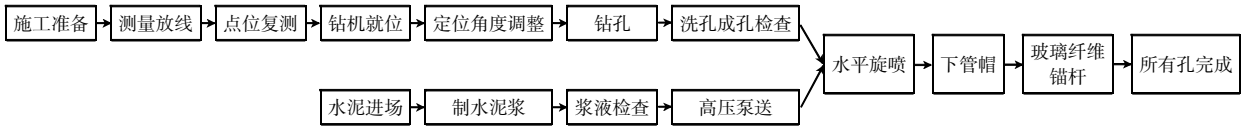


图 4　水平旋喷加固施工工艺流程图

施工前进行场地平整并完善排水系统，以防止地基软化。测量放样后，采用红油漆精确标记孔位并计算外插角。钻孔工序采用分级成孔法，先钻进 1.5 m 安装 ϕ168 mm 孔口管，随后采用 ϕ150 mm 钻头穿越初期支护钢架及涌泥段，最后改用 ϕ120 mm 钻头钻至设计深度，全过程留取芯样并记录围岩信息，严格控制外插角偏差在 1%以内。成孔后退出钻杆，安装旋喷钻具至孔底。浆液采用硫铝酸盐水泥配制，水灰比为 0.5∶1，并根据涌水量及旋喷压力动态调整配合比。旋喷作业

时，后台泵压控制在 45~50 MPa，钻杆转速设定为 12~15 r/min，在孔底原位喷射 60 s 后，自下而上匀速提升钻杆进行旋喷成桩。若施工中断，搭接长度严格控制在 1 m 以上。喷射结束后立即清洗管路，防止喷嘴堵塞。为控制群桩效应及地层扰动，现场采用间隔跳孔作业方式，先施工单号孔位，再施工双号孔位，相邻桩施工间隔控制在 12 h 以上，确保成桩质量与围岩加固效果。

施工中建立了以“压力–流量–转速–提升速度”为核心的四维协同控制体系，水平旋喷关键施工参数控制标准如表 1 所示。

表 1　水平旋喷关键施工参数控制标准表

控制维度	参数	设计值范围	控制目标	监测频率
压力控制	喷射压力	45~50 MPa	确保射流有效切割	实时监测
流量控制	浆液流量	170~220 L/min	保证桩体连续性	1 次/5 min
运动控制	钻杆转速	12~15 r/min	实现均匀搅拌	实时监测
	提升速度	5 cm/(12~15 s)	控制桩径与密度	每根桩全程记录
浆液控制	水灰比	0.45~0.55	确保浆液性能	1 次/盘
	浆液密度	≥1.65 g/cm^3	保证固结体强度	1 次/h

2.5　关键施工工序

水平旋喷施工质量受控于若干关键工序，需针对性地加强控制与过程管理，主要包括以下 4 个方面。

1）分级成孔与方向控制

由于隧道内作业空间受限且需穿越初期支护钢架及涌泥段，采用分级成孔法可有效降低卡钻风险、提高成孔精度。先安装 ϕ168 mm 孔口管作为导向基准，随后逐级缩小钻头直径，既保证了穿越复杂地层的通过性，又可将外插角偏差控制在 1%以内。全过程留取芯样并记录围岩信息，为后续旋喷参数的动态调整提供依据。该工序的核心在于方向控制，直接决定旋喷桩能否按设计轮廓形成封闭加固圈。

2）浆液配制与动态调整

浆液性能是影响固结体强度与抗渗性的关键因素。本工程采用硫铝酸盐水泥，水灰比控制在 0.45~0.55，浆液密度不低于 1.65 g/cm^3。硫铝酸盐水泥具有早期强度高、凝结时间短的特点，适用于富水软弱地层的快速加固需求。施工中需根据涌水量及旋喷压力动态调整配合比：当涌水量增大时，可适当降低水灰比或添加速凝剂，以防止浆液被地下水稀释；当旋喷压力波动较大时，需检查浆液流动性是否满足泵送要求。

3）旋喷参数协同控制

旋喷成桩质量取决于“压力–流量–转速–提升速度”四维参数的协同匹配[3]。本工程采用以下核心施工参数：喷射压力为 45~50 MPa，浆液流量为 170~220 L/min，钻杆转速 12~15 r/min，提升速度 5 cm/(12~15 s)。其中，提升速度与转速的匹配尤为关键，二者共同决定了单位长度桩体的旋喷搅拌次数，进而影响桩径均匀性和固结体强度。施工中在孔底增设原位喷射 60 s 的环节，确保桩底区域的充分加固，避免形成加固盲区。

4）跳孔作业与中断处理

为控制群桩效应及地层扰动，现场采用间隔跳孔作业方式：先施工单号孔位，再施工双号孔位，相邻桩施工间隔控制在 12 h 以上，以预留足够时间让先成桩体达到一定强度，避免后序钻孔对相邻未凝桩体产生挤压破坏。若因设备故障或其它原因导致旋喷施工中断，搭接长度须严格控制在 1 m 以上，并在恢复施工前对搭接部位进行预喷处理，确保新旧桩体之间的连续性与整体性。

3　实施效果

那务隧道全长软弱围岩带涌水突泥段约为 200 m，地下水极为发育，经过水平旋喷加固后整体围岩稳定，泄水孔水流均匀，钻芯取样结果岩芯强度高达 15 MPa、密实度较好，加固长度满足要求，可实现隧道正常循环开挖进尺。

3.1　稳定性监测

1）变形控制：水平旋喷加固段开挖期间，拱顶沉降和净空收敛速率均控制在 3 mm/d 以内，且在支护封闭后 7 d 内基本稳定，远小于未加固段的 15~20 mm/d。

2）渗流场控制：通过埋设渗压计监测，加固圈内外水压差达到 0.2~0.3 MPa，表明旋喷桩帷幕形成了有效的阻水屏障。掌子面由原来的股状涌水变为均匀渗湿，日排水量减少 60%以上。

3.2　结构与力学性能

芯样采取率达到 85%以上，桩体连续完整。电镜扫描(SEM)显示，水泥水化产物与泥质粉砂岩颗粒形成致密的网架结构，界面结合良好。无侧限抗压强度试验显示，28 d 强度平均值为 15.3 MPa，最高达 16.2 MPa，离散系数小于 15%，表明桩体均匀性好。检测结果见表 2。

表 2　旋喷桩芯样强度检测统计表

MPa

项目	6 m 处强度	12 m 处强度	18 m 处强度
桩号 1	14.8	15.3	15.6
桩号 2	16.2	15.7	14.9
桩号 3	15.1	14.8	15.4
平均值	15.4	15.3	15.3

3.3　综合效益

尽管水平旋喷加固技术成本约为常规注浆的 2~3 倍，但综合效益显著：避免了一次重大塌方事故（估算处理费用约 500 万元）；将断层带通过时间从预估的 120 d 缩短至 35 d，节省管理成本约 150 万元；保障了关键线路的施工连续性，为项目提前 3 个月通车创造了条件，社会效益巨大；实现了复杂地质段“零伤亡、零事故”的安全目标。

4　结语

水平旋喷技术通过高压射流切割、搅拌与水泥浆液复合的机理，有效解决富水致密泥质粉砂岩地层中常规注浆渗透性差的技术难题。通过优化设计形成的双环咬合桩加固体系，能在掌子面前方形成厚度 1.5~2.0 m、强度 15 MPa 以上的连续承载壳体，显著改善围岩力学性能和水理性质。建立的“压力–流量–转速–提升速度”四维协同控制体系和信息化施工管理系统，保障了成桩质量和加固效果的可控性。工程实践表明，该技术具有良好的技术经济性和安全性，为类似地质条件下的隧道安全施工提供了成熟可靠的技术方案。

参考文献：

[1] 黄润秋，林峰，陈德基.中国西部复杂山体工程地质[M]. 北京：地质出版社，2016.

[2] 马福荣，张信贵，易念平，等. 南宁盆地软硬水平互层泥岩强度特性分析[J]. 广西大学学报（自然科学版），2012，37（1）：147–151.

[3] 朱国保. 软弱破碎围岩隧道中管棚超前预支护技术研究[D]. 成都：西南交通大学，2007.