气举反循环清孔工艺研究与应用

刘浪，陈璇璇
（中交一航局第二工程有限公司）

摘　要：为解决传统清孔工艺在复杂地层中易出现沉渣厚度超标、效率低、对大直径深孔适应性差等问题，以余杭高架桥桩基工程为依托，通过改进气举反循环设备与优化工艺参数提升清孔效果。研究基于气液两相流动力学理论，揭示了风压、进气管埋深比等参数与排渣效率的定量关系；创新设计了气举反循环清孔装置，通过环空射流结构解决了传统进气管易堵塞和沉渣控制难题。采用正交试验法优化了工艺参数组合，并在直径 1.8 m、平均孔深 60 m 的桩基中开展工程验证。结果表明：沉渣厚度稳定控制在≤5 cm，清孔时间缩短 40%；混凝土灌注后Ⅰ类桩比例提升至 98%，综合成本降低 22%，且泥浆循环利用率达 92%，单桩减少废浆 8 m^3。该工艺为深大桩基清孔提供了可靠理论依据及技术指导，可为相关工程提供参考。

关键词：气举反循环；清孔工艺；参数优化；桩基施工

0　引言

钻孔灌注桩施工中，清孔质量直接影响桩基承载力和耐久性。传统正循环与反循环清孔工艺在复杂地层(如深水、大直径或含卵石、圆砾、流砂层、中风化岩)中，普遍存在沉渣难以彻底清除、清孔效率低下、泥浆性能要求苛刻等问题[1]。正循环泥浆上返流速不足，易导致粗颗粒沉渣滞留孔底；反循环虽效率较高，但对设备密封性及地层稳定性要求严格，在松散地层易塌孔。这些局限性已成为制约大直径深孔桩基施工质量与进度的关键瓶颈。

近年来，气举反循环清孔工艺因其能产生较大排渣量和较高上返流速，在深孔、大直径桩清孔中展现出潜力。国内外学者围绕其机理与应用开展了探索。理论研究多集中于气液两相流动力学模型，探讨气体注入量、进气管埋深与清孔效率的关系。然而，现有研究仍存在不足：1）对复杂地层(如高渗透性砂层、黏土层、中风化岩层)中气举效率骤降及孔壁稳定性影响机理研究不深，缺乏定量描述；2）缺乏系统化的工艺参数(如空压机风压、风量、进气管埋深比)优化体系，导致沉渣厚度控制精度差，常超出规范允许的 5 cm 限值；3）设备适应性不足，传统泥浆泵易堵塞，影响清孔连续性。上述不足限制了该工艺在大规模基础设施工程中的可靠应用。

本文依托余杭高架桥群桩基础工程(桩径 1.8 m，平均孔深 60 m)，基于气液两相流动力学理论，建立了风压风量、埋深比与排渣效率的定量关系，创新设计了环空射流式气举反循环装置，并通过正交试验获得最优参数组合。旨在实现沉渣厚度≤5 cm、清孔效率提升 30%以上，并为类似工程提供可复用的技术方案。

1　气举反循环清孔工艺机理

气举反循环清孔的核心在于通过压缩空气注入进气管，在混合段与泥浆形成密度更低的气液混合流，从而在导管内形成压差，孔底能形成强力的向上射流，随着泥浆上返流速提高，大部分区域流速超过临界悬浮速度，孔底局部剪切力和泥浆上返速度克服颗粒的沉降趋势，驱动泥浆携带孔底沉渣向上流动[2]。为定量描述这一过程，采用 RSM-SY8C 基桩超声波 CT 成像仪及 RSM-STD 沉渣厚度检测仪进行沉渣颗粒轨迹追踪，形成气液两相流动力学模型，如图 1 所示。

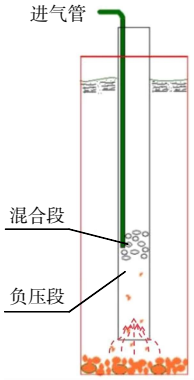


图 1　气液两相流动力学模型

2　工艺参数试验

2.1　多因素正交试验设计

在气举反循环清孔工艺的优化过程中，参数组合的科学选取是提升清孔效率与质量的关键环节。基于气液两相流动力学原理，风量、风压及进气管埋深比三者共同决定了孔底沉渣的悬浮与运移效率。为系统量化各参数的影响权重并寻求最优解，设计了多因素正交试验方案。具体选取风量(8 m^3/min、10 m^3/min、12 m^3/min)、风压(0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa)和进气管埋深比(0.6、0.7、0.8)3 个核心因素，每个因素设置 3 个水平，采用正交表安排试验。该设计能够在较少试验次数下高效评估多因素的交互作用，同时试验指标聚焦于直接影响桩基质量的沉渣厚度以及反映施工效率的清孔时间。

2.2　试验结果分析

试验实施过程中，严格确保操作规范与数据采集的一致性。每次试验均记录从清孔启动至孔底沉渣厚度稳定的时间，并采用测渣仪精确测定最终沉渣厚度。试验使用统一配比的膨润土泥浆，减少试验结果干扰因素，每组试验重复 3 次取平均值。正交试验数据见表 1。

表 1　正交试验方案与结果

试验号	风量/(m^3·min^{-1})	风压/MPa	埋深比	沉渣厚度/cm	清孔时间/min
1	8	0.4	0.6	12	180
2	8	0.6	0.7	8	150
3	8	0.8	0.8	6	130
4	10	0.4	0.6	10	165
5	10	0.6	0.7	6	140
6	10	0.8	0.8	4	105
7	12	0.4	0.6	9	155
8	12	0.6	0.7	7	120
9	12	0.8	0.8	5	110

由正交试验结果及施工实践可知，不同参数组合下清孔效果存在差异。其中风压对沉渣厚度和清孔时间的影响较为突出，风压变化对 2 项指标的影响最大，进气管埋深比深刻影响着能量的传递效率，风量的影响相对次之。存在一个最优埋深比范围，在此范围内风压的能量最有效地转化为孔底流体动能，提升风压能最有效地增强沉渣悬浮能力并提高排渣流量。该优化结果的物理机制为：较高的风压提升了压缩空气注入的能量，增强了气液混合流对孔底沉渣的卷吸能力，是突破沉渣悬浮临界阻力的主导因素；适中的风量确保气流形成稳定连续的上升流；合理的埋深比使气流能量在沉渣富集区高效释放。正交试验方法有效揭示了参数间的协同机制，为工艺标准化提供了定量依据。

3　工程应用

3.1　工程概况

余杭区崇贤至老余杭连接线(高架)工程起于秋石快速路余杭段疏港互通，终于老余杭，路线全长 33.6 km，涉及桩径 1.5 m、1.8 m，桩基按端承桩设计，施工除满足设计桩长外，还要求嵌岩深度不小于 2 倍桩径。通过地质勘察报告表明，桩基持力层均为中风化岩，岩石饱和抗压强度高，从原地面向下依次为杂填土、黏土、砂层(粉砂、细砂、砾砂)、圆砾、中风化岩等。

前期施工过程中，采用传统反循环工艺清孔，见图 2，泥浆泵在复杂地层作业时易因沉渣淤积或岩屑吸附导致堵塞失效[3]。为克服该问题，创新设计了气举反循环结构，见图 3。



图 2　传统反循环工艺



图 3　气举反循环工艺

3.2　气举反循环工艺

气举反循环工艺核心设备配置为：1）额定排气量 13.6 m^3/min、工作压力 0.8 MPa 的螺杆式空气压缩机；2）下端配重的进气管（公称直径 5 mm）；3）泥浆净化装置（处理能力 200 m^3/h，渣料筛分能力 25~80 t/h、分离粒度0.06 mm、总功率 48 kW）；4）发电机（功率大于 300 kW·h）；5）平板拖车。

气举反循环工艺核心特征在于压缩空气从进气管进入导管，在孔底附近释放时产生环空射流。该射流的关键作用包括：1）高速流体对孔底沉渣产生强力扰动与卷吸，破坏沉积层；2）射流形成的局部低压区强化了携渣上升能力；3）环空结构避免了传统泥浆泵的堵塞风险。工程实测表明，环空射流可使沉渣板结风险降低 80%以上。

清孔过程中人工调节进气管末端距孔底的距离，根据孔深确保进气管始终处于最优埋深比区间（0.6~0.8）。同时左右摆动导管，使孔底环空射流扰动更大面积的沉渣沉积层，保障气举效率的持续稳定和清孔彻底。孔底泥浆（携带沉渣）在压差的作用下，通过导管流出，经过出浆管到达泥浆分离器，泥浆分离器将泥浆中的沉渣分离出来，净化后的泥浆再通过泥浆管流入孔中，如此往复循环，达到净浆清孔的目的。气举反循环施工如图 4 所示。



图 4　气举反循环施工图

4　应用效果

4.1　工程质量

在余杭高架桥直径 1.8 m、平均孔深 60 m 的桩基工程中应用气举反循环装置，清孔效果获得突破性提升。工程效果通过超声波检测进行量化评估：孔底沉渣厚度经多点测量均值为 4 cm，稳定控制在 5 cm 以内，验证了设备创新的有效性。后续混凝土灌注成桩的检测数据显示：在 32 根应用该工艺的桩基中Ⅰ类桩占比达 98%，而同期采用正循环工艺的对照桩组Ⅰ类桩占比仅为 85%。这种提升源于清孔彻底性改善，避免了沉渣导致的桩底缺陷。

气举反循环装置通过环空射流优化流场，实现了沉渣厚度的精准控制（≤5 cm），解决了深大桩基清孔的关键难题。其技术优势在深孔、高含泥质、中风化岩地层中更为突出[4]。

4.2　综合成本

本文在验证气举反循环清孔工艺技术效能的基础上，进一步进行了综合成本分析对比，如表 2 所示。

表 2　成本分析对比表

项目	清孔时间/h	人工费/元	机械费/元	费用合计/元
传统反循环工艺	3.5	770	706.25	1 476.25
气举反循环工艺	2.0	210	942.00	1 152.00

对比采用传统反循环工艺与气举反循环工艺进行清孔作业的结果显示，气举反循环工艺在清孔效率上展现出优势，气举反循环工艺单桩清孔时间约 2 h，较传统反循环工艺缩短了 40%以上。效率提升直接带来了多方面成本的降低，包括：

1）人工费用因作业时间缩短而大幅减少；

2）设备占用时间减少，同比降低了设备使用成本；

3）缩短了单桩施工周期，有效降低了项目管理等间接费用；

4）增加了后续承台及下构等结构物施工的连续性，降低了材料及机械设备倒运的成本。

综合各项成本因素，传统反循环工艺单桩清孔费用为 1 476.25 元，气举反循环工艺单桩清孔费用为 1 152 元，采用气举反循环工艺后，单桩清孔的总成本下降了 22%，经济效果显著。

传统反循环工艺在深孔条件下，泥浆上返速度衰减严重，清孔时间非线性延长，导致人工、设备和管理成本激增；而气举反循环依靠压缩空气提供的强大压差，能更有效地维持深孔中的泥浆循环速度和携渣能力。因此，气举反循环清孔工艺更具有经济性优势，为深大桩基工程清孔方案的选择提供了有力的成本决策依据。

4.3　资源节约与减排效果

传统泥浆循环系统重复利用率低、废渣产生量大。气举反循环工艺通过泥浆净化装置，将泥

浆循环利用率从常规工艺的 60%提升至 92%以上。以单根直径 1.8 m、孔深 60 m 的灌注桩为例，废渣产生量较传统工艺减少 8 m^3。这一减排效果源于工艺对孔底沉渣的高效悬浮与抽取净化能力，减少了反复清孔产生的二次废渣。

5　结语

本文通过工程实践验证了气举反循环清孔工艺在解决大直径深孔清孔难题上的效果。核心创新点体现在 2 个方面：1）基于气液两相流动力学原理，创新设计的气举反循环结构有效克服了传统反循环的缺陷。该结构利用环空射流改善孔底流态，增强了气举效率，使得清孔深度得以突破传统工艺的限制，成功应用于 60 m 以上的深孔作业。2）通过正交试验建立了风量、风压与进气管埋深比等关键参数的优化匹配体系。这一体系提升了沉渣控制的精度，实测沉渣厚度可稳定控制在≤5 cm，相比传统工艺普遍存在的 15 cm 以上沉渣，控制精度显著提高，为桩基混凝土的优质灌注奠定了坚实基础。

工程应用数据表明，该工艺不仅将清孔效率提升了 40%，更使桩身完整性Ⅰ类桩比例达到 98%，同时大幅降低了泥浆消耗和废渣排放，体现了良好的技术经济性。该设计为复杂地质条件下钻孔灌注桩的高质量施工提供了可靠的技术装备支撑，具有广阔的工程推广价值。未来研究需关注该装置在超深孔（>150 m）及极端硬岩地层中的适应性，以进一步提升工艺的普适性。

参考文献：

[1] 王卫平. 流砂地层桩基施工技术探讨[J]. 内蒙古公路与运输，2011(2)：45–46.

[2] 吴钰. 浅谈桥梁桩基施工技术[J]. 科技与企业，2015(1)：153.

[3] 杨士尧，黄芳娟. 关于桥梁桩基施工技术的探究[J]. 科技创新与应用，2015(16)：224.

[4] 李嘉成，姬付全，饶为胜，等. 钻孔灌注桩数字化施工技术及应用[J]. 中国港湾建设，2024，44(6)：72–77.