

公路桥梁预应力孔道智能压浆质量控制技术

徐 煦

中肆工程咨询有限公司江西分公司 江西吉安 343000

摘要：公路桥梁预应力孔道压浆是保障结构耐久性与承载能力的关键工序，传统压浆工艺存在诸多质量隐患，制约了桥梁工程整体质量。本文围绕传统压浆工艺的核心缺陷及成因展开理论分析，系统阐述智能压浆系统的核心技术构成，详细说明智能压浆全流程的质量控制要点，通过技术原理与实践要点的结合，凸显智能压浆技术在提升压浆质量稳定性、可靠性方面的优势，为公路桥梁预应力孔道施工质量控制提供技术参考。

关键词：公路桥梁；预应力孔道；智能压浆；质量控制

引言

预应力孔道压浆作为后张法预应力混凝土桥梁施工的核心环节，其施工质量直接关系到预应力筋的防腐保护与结构整体刚度，对桥梁的长期安全运营具有决定性影响。在公路交通建设快速发展的背景下，桥梁工程对施工质量的要求不断提高，传统压浆工艺逐渐暴露出难以克服的局限性，成为影响工程质量的突出问题。智能压浆技术凭借自动化、精准化、信息化的技术特征，有效弥补了传统工艺的不足，为预应力孔道压浆质量控制提供了全新解决方案。深入研究智能压浆技术的核心构成与全流程控制要点，对于推动公路桥梁施工技术升级、保障工程结构安全具有重要的现实意义，也为行业高质量发展注入技术动力。

1 传统压浆工艺的质量缺陷与成因

1.1 压浆不密实与孔道空洞问题

在传统压浆工艺中，压浆不密实以及孔道内部形成空洞是最为常见且影响严重的质量问题。该问题的产生主要归因于多个方面：首先，传统压浆设备的压力输出往往缺乏足够的稳定性，其压力波动较大，难以保证浆液能够在结构复杂、走向多变的孔道中实现均匀且充分的填充。其次，孔道内壁的清洁度常常未能达到施工要求标准，残留的杂物、灰尘或油污等污染物会附着在孔道表面，阻碍浆液与孔道壁之间的有效粘结，从而在局部区域形成明显的空隙或薄弱界面。此外，传统工艺对于压浆顺序的安排通常缺乏系统性的科学指导，尤其是在多跨连续或长距离孔道的施工过程中，由于排气措施不够彻底，容易造成空气无法完全排出而滞留在孔道内部，最终形成空洞缺陷。这些质量问题会显著削弱

预应力体系的整体性与连续性，进而降低桥梁结构的承载能力与长期耐久性，对工程安全构成潜在威胁。

1.2 浆液离析与泌水问题

浆液本身的性能稳定性是影响压浆质量的关键因素，而在传统压浆工艺中，浆液离析与泌水现象普遍存在且难以避免。一方面，传统工艺对浆液配比的控制主要依赖于施工人员的经验与手动操作，其配料精度受到人为因素影响较大，水泥、外加剂及水的投加比例容易出现偏差，这种配比的不准确性会直接导致浆液性能失衡，使其无法满足设计要求。另一方面，传统搅拌设备的功能存在局限，其搅拌均匀性较差，浆液在搅拌过程中难以形成均质、稳定的胶体结构。在后续的压浆施工中，由于浆体稳定性不足，容易出现粗骨料下沉、自由水分上浮的离析现象。同时，浆液泌水会在孔道内部形成局部积水区，这不仅显著削弱浆体与预应力筋及孔道壁之间的粘结强度，还会因水分长期滞留而引发预应力筋的锈蚀问题。长期来看，上述问题会严重损害桥梁结构的整体性能与使用寿命，成为影响结构安全的潜在隐患^[1]。

1.3 人为操作与过程控制的不稳定性

传统压浆工艺的质量控制很大程度上依赖于操作人员的个人经验与主观责任心，而人为操作的不确定性以及过程控制的缺失是造成质量波动的主要原因。由于不同操作人员的技术水平、操作习惯及责任意识存在差异，对压浆过程中的关键参数（如压浆压力、压浆速度、持压时间等）的把控往往缺乏统一、科学的标准，容易因个体差异导致操作上的不一致甚至失误。同时，传统工艺缺乏有效的实时监测与反馈机制，无法在压浆过程中对压力变化、浆液流动状态及可

能出现的泄漏等问题进行即时识别与干预，只能在施工结束后通过破损或非破损检测方法进行质量验证，难以实现施工过程中的动态调整与优化。这种相对被动、事后纠偏的质量控制模式，使压浆过程中存在的各类风险与隐患无法被及时察觉与排除，最终导致整体施工质量出现较大波动，不仅增加了工程返工的概率与修复成本，也对项目的长期可靠性产生了不利影响。

2 智能压浆系统的核心技术构成

2.1 浆液性能的自动化调控技术

智能压浆系统借助先进的浆液性能自动化调控技术，彻底解决了传统压浆工艺中存在的浆液配比精度不足、搅拌不均以及质量波动大等一系列问题。该技术以高精度的物料动态计量系统为基础，通过布置于配料环节的多类传感器，实时采集水泥、外添加剂、水等原料的实际投加重量，并将数据即时传输至中央控制单元。控制系统依据预设的配比参数，自动完成物料的称量与投料，确保每一批制备的浆液配比误差严格控制在允许范围之内。在搅拌阶段，系统配备智能搅拌装置，采用变频调速技术与多维立体搅拌模式，通过科学设计搅拌叶片的形态结构和工作轨迹，显著提升浆液的混合均匀性与搅拌效率，从而保证浆液形成致密且稳定的胶体结构。此外，系统还集成浆液温度自动调控模块，依托加热与冷却设备实时调节浆液温度，使其始终处于最适宜的施工区间，有效抑制因环境温度变化引起的浆液流变性、凝结时间等性能指标的波动，全面保障浆液在压浆过程中持续具备优良的工作性^[2]。

2.2 压浆过程的实时监测与控制技术

作为智能压浆系统的关键核心，压浆过程的实时监测与控制技术借助布置于全流程的多维度传感器网络，实现对压浆作业的全程动态化、精细化监控。系统在压浆泵、孔道进出口以及其他关键节点处设置多种传感器，包括压力传感器、流量计与密度检测装置等，实时采集压浆过程中的核心参数，如系统压力、浆液瞬时流量、浆液密度等，所有数据通过通信网络实时上传至中央控制平台。控制单元根据预设的工艺参数与阈值范围，对压浆过程实施自动反馈与调节。例如，当系统识别到压力低于设定标准时，会自动提高泵送设备的输出功率以恢复压力；当监测到浆液流量异常波动时，系统能够及时启动诊断程序，提示可能的渗漏点或堵塞风险，并发出声光预警。这种实时数据采集与闭环控制相结

合的方式，使压浆全过程的关键参数始终维持在工艺要求的最优状态，真正实现了压浆作业的精准控制，从根本上杜绝了因人为操作失误或参数失控导致的压浆不密实、孔道未满灌等质量缺陷。

2.3 压浆数据的采集与追溯技术

智能压浆系统所配备的压浆数据采集与全过程追溯技术，为压浆工程质量的控制与管理提供了全面、可靠的信息化支撑。该系统具备完善的数据自动采集与存储功能，可对压浆施工中涉及的各类关键参数进行连续、完整的记录，包括原材料实际配比、搅拌持续时间、系统压力实时变化曲线、浆液温度监测数据、总压浆时长等，从而构建起每一压浆孔道的完整数字档案。数据管理采用本地与云端协同存储策略，既保障了数据的安全性与完整性，又支持实时上传与远程多方访问。基于该技术，项目管理人员可随时按批次、工点、时间等条件检索历史数据，对不同区段、不同时期的压浆质量进行横向与纵向对比分析，实现压浆质量的可视化、可追溯管理。在出现质量隐患或实体缺陷时，能够借助系统快速回溯相关施工记录，精准定位问题成因，为制定修复措施和改进施工方案提供数据依据。同时，这些积累的真实、结构化数据也为后续同类工程的工艺优化和质量管理提供了宝贵的参考^[3]。

3 智能压浆全流程的质量控制要点

3.1 压浆前的设备调试与系统校验

压浆前的设备调试与系统校验是保障智能压浆质量的基础环节，必须严格落实各项准备工作。首先，对智能压浆设备进行全面检查，包括压浆泵、搅拌器、传感器、控制系统等核心部件的运行状态，确保设备无故障、无泄漏。对传感器进行精准校准，通过标准仪器对压力、流量、重量等传感器的测量精度进行校验，确保采集数据的准确性。其次，对孔道进行彻底清理，采用高压气流与清水交替冲洗的方式，去除孔道内的杂物、油污与积水，确保孔道内壁清洁干燥，为浆液粘结创造良好条件。同时，根据工程设计要求与孔道实际情况，在控制系统中预设浆液配比、压浆压力、压浆速度等参数，通过模拟压浆试验验证参数设置的合理性，确保系统在实际施工中能够稳定运行。

在某高速公路桥梁项目中，施工团队在压浆前对智能压浆设备进行了全面调试，对压力传感器进行了三次重复校准，确保测量误差控制在 $\pm 0.05\text{ MPa}$ 以内。通过高压气流清

理长距离孔道，并用内窥镜检查孔道清洁度，确保无残留杂物。在模拟试验中，根据孔道长度与截面尺寸调整压浆压力参数，最终确定最优施工参数，为后续正式压浆奠定了坚实基础^[4]。

3.2 压浆中的关键参数动态监控

压浆过程中的关键参数动态监控是质量控制的核心环节，需要依托智能压浆系统的实时监测功能，实现对各项参数的精准把控。在压浆过程中，重点监控压浆压力与浆液流量的变化，确保压力保持在设计要求的稳定区间，流量均匀无突变。当系统检测到压力异常升高时，可能是孔道堵塞，应及时暂停压浆，排查故障后再继续施工；当压力持续偏低时，需检查是否存在浆液泄漏或孔道贯通性问题，及时采取补漏、封堵等措施。同时，关注浆液的温度与密度变化，确保浆液性能稳定，避免因温度过高或过低导致浆液凝结时间异常，或因密度变化引发离析现象。

在多跨连续梁孔道压浆施工中，智能压浆系统通过分段监控的方式，对每一段孔道的压浆参数进行独立调控。根据孔道的长度与坡度变化，自动调整压浆压力，确保浆液在各段孔道中均能充分填充。施工过程中，控制系统实时生成压力 - 流量变化曲线，管理人员通过曲线趋势判断压浆质量，当曲线出现平稳上升且保持稳定时，表明压浆过程正常；若曲线出现剧烈波动，则及时停机检查，有效避免了因参数失控导致的压浆不密实问题。

3.3 压浆后的质量评定与数据管理

压浆后的质量评定与数据管理是对施工质量的最终检验与总结，为工程质量验收提供重要依据。压浆完成后，首先通过智能压浆系统导出完整的施工数据档案，包括浆液配比记录、压浆参数变化曲线、施工时间等信息，对数据进行整理分析，判断各项参数是否符合设计要求。同时，采用无损检测技术对孔道压浆密实度进行检测，常用的检测方法包括超声波检测、雷达检测等，通过检测结果验证压浆质量，确保无空洞、无离析等缺陷。对检测中发现的质量问题，结合数据追溯结果制定针对性的整改措施，及时进行补压浆处理，确保整体压浆质量达标。

此外，建立完善的数据管理体系，将各项目的压浆施工数据进行分类归档，形成标准化的数据库。通过对不同项目、不同工况下的施工数据进行统计分析，总结智能压浆技术的

应用规律，为后续工程的参数优化提供数据支持。同时，数据档案可作为工程质量追溯的重要依据，在桥梁运营阶段，若出现结构病害，可通过调取施工数据，分析压浆质量与病害的关联性，为桥梁维护提供科学参考^[5]。

4 结语

公路桥梁预应力孔道压浆质量是保障桥梁结构安全与长期稳定运营的关键因素，传统压浆工艺的诸多缺陷已难以满足现代桥梁工程的质量要求。智能压浆技术通过浆液性能自动化调控、压浆过程实时监测与控制、压浆数据采集与追溯等核心技术的集成应用，有效解决了传统工艺中存在的质量不稳定、过程控制缺失等问题。通过严格落实压浆前的设备调试与系统校验、压浆中的关键参数动态监控、压浆后的质量评定与数据管理等全流程质量控制要点，能够显著提升预应力孔道压浆的密实度与均匀性，保障压浆质量的稳定性与可靠性。智能压浆技术的推广与应用，不仅推动了公路桥梁施工技术的智能化升级，也为工程质量控制提供了更为科学、高效的解决方案。在未来的公路桥梁建设中，应进一步加强智能压浆技术的研发与实践应用，不断优化技术参数与控制流程，充分发挥其在质量提升、效率提高、成本节约等方面的优势。通过技术创新与管理升级的协同发力，持续提升公路桥梁工程的整体质量水平，为我国交通基础设施的高质量发展提供坚实保障。

参考文献：

- [1] 周梓彬. 提升梁体预应力孔道压浆密实度的控制及改进措施 [C]//2021 年全国土木工程施工技术交流会 . 苏州中车建设工程有限公司 , 2021.
- [2] 王波 . 预应力孔道压浆质量控制 [J]. 大众标准化 , 2020(8):2.DOI:CNKI:SUN:DZBH.0.2020-08-006.
- [3] 孙智荣 . 高速公路桥梁预应力孔道压浆质量检测与分析 [J]. 山西建筑 , 2020, 46(8):3.DOI:CNKI:SUN:JZSX.0.2020-08-061.
- [4] 陈熙贵 , 欧运平 , 彭伟哲 . 桥梁后张预应力孔道压浆技术对在役桥梁结构安全的影响分析 [C]// 第三届全国在役桥梁安全运营保障技术大会 . 同济大学 ; 桥梁工程与技术网 , 2021.
- [5] 王殿虎 , 姜云朴 , 张亮奎 . 后张法预应力混凝土简支箱梁张拉和孔道压浆质量控制研究 [J]. 2022.