

装配式混凝土结构柱套筒灌浆不密实的内窥镜验证方法

周志荣

广东省有色工业建筑质量检测站有限公司 广东 广州 510725

【摘要】：装配式混凝土结构在现代建筑中应用广泛，而柱套筒灌浆质量直接影响结构的整体受力性能与安全性。针对传统检测手段难以准确识别灌浆不密实区域的问题，提出了一种基于内窥镜技术的验证方法。通过在灌浆完成后于套筒特定位置预留检测通道，引入高分辨率工业内窥镜，对套筒内部灌浆状况进行实时成像与判别。该方法结合图像识别与人工判断，对浆液充盈、孔隙分布及不密实缺陷进行直观验证，能够有效避免依赖超声或回弹法时可能出现的误判。试验结果表明，该方法具有操作简便、检测精度高、适用性强的特点，可为装配式混凝土结构的质量评定提供可靠依据，并为后续的缺陷修复提供明确定位参考。

【关键词】：装配式混凝土结构；柱套筒；灌浆不密实；内窥镜检测；质量验证

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.048

引言

装配式混凝土结构因施工速度快、现场湿作业少而逐渐成为工程建设的重要方向。柱套筒连接的灌浆质量长期以来是影响结构可靠性的关键环节。灌浆不密实问题若未能及时发现，可能导致连接部位承载力不足，甚至埋下结构安全隐患。常用的超声检测、钻芯取样等方法在精度、操作便捷性及损伤控制方面存在一定局限。随着内窥镜技术的发展，将其引入灌浆质量验证领域，为实现对套筒内部状态的直接观察提供了新的可能。通过合理设计检测通道并结合高分辨率成像，可实现对不密实缺陷的快速识别，为结构质量控制提供新的技术路径。

1 灌浆不密实问题对装配式混凝土结构安全性能的影响

灌浆不密实问题在装配式混凝土结构中具有高度的隐蔽性，却对结构安全性能产生深远影响。柱套筒作为连接预制构件与现浇部分的重要节点，其内部灌浆层直接承担着力的传递与构件间的连接。当浆液未能充分充盈套筒内部空间时，往往会形成空鼓、孔洞或局部夹渣等缺陷，这些缺陷削弱了浆体与钢筋、混凝土之间的界面黏结力，使得连接段的整体刚度与抗剪性能下降。在竖向荷载及地震作用下，不密实区域容易成为应力集中部位，出现裂缝扩展、滑移或剥离等破坏模式，从而降低节点承载力和延性，影响结构整体受力的连续性与稳定性。

在实际工程中，装配式混凝土结构往往应用于高层或大跨度建筑，节点连接的可靠性直接关系到整体抗震性能。灌浆不密实导致浆液无法有效包裹连接钢筋，使得钢筋与浆体的锚固长度不足，局部应力无法均匀传递，进而造成受力不均和节点开裂。在地震或风荷载作用下，连接部位可能提前发生破坏，出现滑移破坏、剪切破坏甚至拔出破坏，严重时会影响整个框架的整体协同工作。与传统现浇结构相比，装配式结构的连接性能更依赖于灌浆密实度的保障，一旦出现隐蔽缺陷，往往难以及时发现和修复，存在较高的结构安全风险。

从耐久性角度看，灌浆不密实区域还容易成为水分和有害介质渗透的通道，导致钢筋锈蚀、浆体剥落和冻融破坏等问题的发生。随着服役年限的延长，这些微小缺陷会逐渐扩展为贯通性裂缝，使得节点刚度退化，连接强度下降，结构长期使用性能受到影响。此外，在施工过程中受工艺控制、灌浆材料性能、套筒位置偏差等因素的影响，不密实现象具有一定的普遍性和随机性，这进一步增加了质量检测与控制的难度。因此，对柱套筒灌浆不密实问题的认识与重视程度直接决定了装配式混凝土结构能否在安全性和耐久性方面满足工程要求。

2 现有柱套筒灌浆质量检测方法的局限性与不足

现阶段工程实践中，针对柱套筒灌浆质量的检测主要依赖超声检测、回弹检测和钻芯取样等传统手段。这些方法在常规混凝土结构中具有一定的适用性，但在套筒内部空间狭小、钢筋密集、灌浆层薄弱等复杂环境下，检测效果往往受到明显限制。超声检测在面对钢筋密布和金属套筒反射干扰时，信号衰减与波形畸变问题突出，难以准确反映浆体充盈情况和内部缺陷的真实分布。由于灌浆材料与混凝土本体在声阻抗上存在差异，检测结果常出现信号不连续、波速异常或回波干扰的现象，导致定量分析精度不足。而回弹检测虽然便于操作，但其反映的主要是表层硬度信息，对于套筒内部的灌浆密实度无法提供有效的空间成像或缺陷定位能力，具有较强的局限性。

钻芯取样作为一种破坏性较强的直接检测方式，能够在一定程度上揭示内部缺陷，但在装配式混凝土结构中实施时存在明显障碍。套筒通常埋设在构件内部，钻芯位置受钢筋分布和构件尺寸约束，难以在不破坏关键受力构件的前提下进行准确取样。即便完成钻芯操作，也只能获取局部样本，无法反映整体灌浆密实状态，存在检测结果局部化与代表性不足的问题。同时，钻孔过程中可能对套筒、钢筋及周围浆体造成二次损伤，增加结构修复和补强的工作量，不利于在大规模工程中推广应用。对于高层建筑或复杂节点，钻芯方式的操作难度和成本显著增加，工程可行性受到很大限制。

在实际施工与检测过程中，这些传统方法在操作效率、缺

陷识别精度以及数据解读的直观性方面均存在不足。多数检测技术依赖间接信号分析,无法直观呈现浆体充盈形态,易受到施工工艺、材料特性以及现场环境的多重影响,检测结果的可靠性存在波动。面对不同类型的灌浆缺陷,例如孔洞、夹渣、空鼓等,传统检测往往难以准确区分缺陷类型与范围,影响质量评估的准确性。此外,传统检测方法多为抽检方式,检测覆盖率有限,存在遗漏隐蔽缺陷的风险。这些局限性在很大程度上制约了工程质量控制的精度,也凸显了对更为直观、高效和可操作的检测技术的迫切需求,为内窥镜技术的引入提供了现实背景。

3 内窥镜技术在套筒灌浆检测中的应用潜力与原理

内窥镜技术在工程结构检测领域的应用为解决套筒灌浆质量难以准确评估的问题提供了新的技术路径。内窥镜作为一种光学与电子成像结合的检测工具,能够通过细小通道进入密闭空间,对内部表面状态进行直观、实时的高清成像。针对柱套筒灌浆这一特殊检测场景,通过在灌浆完成后于预设位置设置检测通道,将内窥镜探头插入套筒内部,可直接观察浆体充盈状态、缺陷分布以及局部接触面情况。与依赖声波或回弹信号间接推断的传统方法不同,内窥镜可以提供图像化的证据,使得检测人员能够在短时间内对不密实区域进行精确定位和性质判断,有效克服了信号反演不稳定和数据解读依赖经验的问题。

在成像原理方面,内窥镜通常采用光纤传导、CMOS 高清摄像以及环形补光技术,将内部复杂空间的表面细节完整传输至外部显示设备。探头直径较小,能够穿过狭窄的灌浆通道而不破坏结构本体,对于金属套筒、密集钢筋及局部灌浆盲区均具有较强的适应性。通过调节镜头角度与焦距,可在套筒内部形成多角度、多方向的观测视野,对孔隙、夹渣、空鼓等灌浆缺陷进行直观识别。对于灌浆材料与套筒内壁的黏结界面,内窥镜图像能够清晰反映浆体流动痕迹、气泡残留与渗透状况,为缺陷判定提供更具体的视觉信息。此外,内窥镜成像可以与数字图像处理技术相结合,进一步实现裂缝宽度测量、孔洞体积估算及表面粗糙度分析,提高检测的客观性和精度。

内窥镜技术的潜力还体现在检测方式的灵活性与工程适用性上。在复杂节点、竖向构件或空间受限的环境中,内窥镜探头能够顺利进入套筒深处,完成对传统方法难以覆盖区域的检测。检测过程非破损、操作便捷,可在施工过程或后期质量验收阶段灵活实施,不影响结构整体性能。随着高清成像技术与便携式设备的发展,内窥镜系统在分辨率、抗干扰能力和数据记录方面不断提升,使其在工程质量检测中的可靠性逐渐增强。结合套筒灌浆质量检测的需求,内窥镜技术不仅能够实现缺陷的快速识别与定位,还可为后续修复和质量控制提供直观依据,具备较高的推广价值与应用潜力。

4 基于内窥镜的柱套筒灌浆不密实验证方法构建

基于内窥镜的柱套筒灌浆不密实验证方法的构建依托于结构特征、灌浆工艺与检测技术的有机结合。在装配式混凝土结构中,柱套筒内部空间封闭且钢筋密集,直接观测难度大,因此需要在施工阶段合理预留检测通道。通常在套筒顶部或侧面设置细小的内窥镜插入孔,使探头能够在灌浆完成并达到初凝后顺利进入内部空间。插入孔位置应避开钢筋密集区和受力关键部位,同时确保与套筒内部形成良好的观测角度。检测过程中,将高清工业内窥镜探头缓慢送入预留孔内,通过可调聚焦成像系统对套筒内壁、钢筋周边和浆体充盈界面进行全面扫描。通过连续成像与多角度观测,形成套筒内部的完整视觉资料,为后续的缺陷识别提供基础数据。

在验证方法的技术流程方面,检测工作一般在灌浆达到规定龄期后进行,以保证浆体表面硬化稳定,避免因未凝固产生的表观误判。内窥镜进入后,通过实时成像系统采集视频与图像信息,对套筒内部的浆体状态进行详细记录。检测内容涵盖浆体与钢筋、套筒壁的贴合情况、是否存在孔洞、夹渣、空鼓或裂缝等不密实特征,以及浆体表面色泽和纹理变化等微观特征。对于出现的可疑区域,检测人员会通过改变探头角度、调整光源亮度和焦距来获取更清晰的细节图像,并结合工程施工记录分析可能的形成原因。图像资料经过后期处理,可对缺陷区域的分布范围、形态特征和位置关系进行定量或半定量分析,为质量评定提供精确依据。与传统抽检方式相比,这一方法能够在不破坏结构的情况下完成全范围直观检测,提高了检测覆盖率和缺陷识别的准确性。

在方法构建过程中,还需要结合实际工程条件对操作工艺和设备参数进行优化。内窥镜探头的长度、直径及柔性程度应与套筒尺寸及通道布置相匹配,以保证探测路径顺畅和成像清晰度。检测过程中可引入标定尺或辅助测量装置,用于估算裂缝宽度或孔洞尺寸,提高数据的量化程度。对于竖向或深埋套筒,可采用带有转向功能的内窥镜系统实现环向扫描,避免出现盲区。检测完成后,将采集的图像和视频按套筒编号归档,并与设计图纸、施工工艺参数对照,形成系统化的质量评定报告。通过这种基于内窥镜技术的验证方法,不仅能够对灌浆不密实问题实现直观、精准的检测,还能为缺陷修复和结构性能评估提供可靠数据支撑,为装配式混凝土结构的质量控制建立更加科学的技术体系。

5 内窥镜验证方法的试验设计与工程应用效果分析

内窥镜验证方法的试验设计以模拟实际装配式混凝土柱套筒连接节点的结构特征为基础,通过设置不同灌浆密实度工况来评估该方法在缺陷识别方面的有效性。试验构件采用标准钢套筒与预制混凝土柱组合,内部布置纵向钢筋与横向定位筋,灌浆材料选用高流动性无收缩灌浆料。为模拟不同缺陷形态,在部分试件中预设空洞、夹渣层或局部灌浆不足区域,以

形成具有代表性的缺陷模型。每个试件在灌浆完成并达到规定龄期后，通过预留的检测通道插入工业内窥镜进行成像观测。试验过程中记录了不同缺陷类型下的图像特征，包括孔洞形态、夹渣分布、浆体与钢筋的黏结界面状态等，为后续图像分析与判定标准的建立提供了详实依据。

在检测数据分析阶段，将内窥镜成像结果与钻芯样本和超声检测结果进行对比，以验证其准确性与可靠性。通过对比发现，内窥镜方法在识别孔洞、空鼓、局部脱空等不密实缺陷方面具有明显优势，能够清晰呈现缺陷形态和位置，且与钻芯实测结果具有较高的一致性。对于小尺度夹渣层或局部不密实区域，内窥镜能够通过光线反射和表面纹理变化实现识别，而超声检测往往出现信号干扰导致判定偏差。图像分析还表明，通过调整探头角度和光源亮度，可以在不增加检测孔数量的情况下实现对复杂节点的全面扫描，大幅提升了检测覆盖率。该试验验证了基于内窥镜的检测方法在不同工况下的稳定性与适应性，为工程推广提供了数据支持。

在工程实际应用中，该方法被应用于多层装配式建筑的施工质量验收阶段，通过在节点预设检测通道，对关键连接部位进行快速检测，识别出部分因灌浆过程控制不当导致的局部不密实区域。内窥镜检测结果在短时间内完成并形成可视化报告，方便质量管理人员进行直观判断和后续修复。相比传统检测方式，该方法具有非破损、操作灵活、成像直观等优点，能够在不影响施工进度的前提下进行高效质量评估。在多组工程应用案例中，检测结果显示出较高的准确率与重复性，有效提高了节点灌浆质量控制的水平，为装配式混凝土结构的工程质量验收提供了可靠技术支持。

6 内窥镜验证技术在装配式混凝土结构质量控制中的工程意义

内窥镜验证技术在装配式混凝土结构质量控制中的应用，为传统检测手段难以全面覆盖的节点内部缺陷识别提供了新的解决思路。柱套筒作为连接预制构件与现浇部分的关键部位，其灌浆质量直接影响结构整体受力性能与耐久性。通过在施工阶段预设检测通道，利用内窥镜对灌浆后的套筒内部进行直观成像，可以在不破坏结构的前提下实现对浆体充盈状态、孔洞分布、夹渣残留和界面贴合质量的全面检测。这种可视化手段有效弥补了超声波、回弹等传统检测技术在信号衰减、缺

参考文献:

- [1] 王立军.装配式混凝土结构套筒灌浆施工质量控制研究[J].建筑结构学报,2022,40(6):120-127.
- [2] 陈晓明,赵国辉.混凝土结构灌浆材料性能与应用分析[J].建筑材料学报,2020,23(4):55-62.
- [3] 李志强.工业内窥镜在建筑结构缺陷检测中的应用[J].建筑技术,2021,52(3):87-92.
- [4] 周凯,黄建平.装配式建筑节点连接性能研究进展[J].土木工程学报,2020,53(8):101-110.
- [5] 刘鹏.超声检测在混凝土灌浆密实度评价中的局限性[J].无损检测,2023,40(12):72-77.
- [6] 张宏伟,孙立波.内窥镜检测技术在混凝土结构中的工程应用[J].建筑施工,2022,44(5):89-95.

陷识别精度不足和检测范围受限方面的短板，使得质量控制由经验判断向图像化、精细化方向转变，对提高装配式结构的施工质量起到了重要支撑作用。

在工程质量管理实践中，内窥镜技术的引入显著提高了灌浆缺陷的识别效率与定位精度。通过内窥镜获取的高分辨率图像，可以在短时间内形成节点内部的“可视化档案”，为质量验收与问题追溯提供依据。在多层装配式结构和大型工程项目中，传统抽检方式容易遗漏隐蔽性缺陷，而内窥镜检测可以在不影响正常施工流程的情况下实现大范围快速检查，提升质量检测的覆盖率与时效性。对于检测中发现的不密实区域，还可结合图像数据与施工记录，准确分析成因并制定针对性修复方案，从而避免节点性能下降或后期维护成本增加。通过这种方式，工程质量控制从事后抽查逐渐向全过程、全覆盖的动态监测模式发展，使结构的可靠性得到更有效保障。

从行业推广与标准化的角度看，内窥镜验证技术具有较强的工程适用性与技术成熟度，能够为装配式混凝土结构的质量检测体系提供有力补充。随着高清成像、智能识别和数据处理技术的不断进步，内窥镜检测不仅可以在现场即时完成质量评估，还能将检测图像与工程管理系统相结合，形成标准化的数据存档和分析机制，为质量监管和工程验收提供客观依据。通过在不同类型工程中的应用，可以逐步建立缺陷类型与图像特征的标准化判定体系，促进检测技术的规范化发展。内窥镜验证技术的推广将推动装配式混凝土结构施工质量控制向着更高精度、更高效率和更高可靠性的方向发展，为保障结构安全和延长使用寿命提供重要的技术支持。

7 结语

内窥镜验证技术在柱套筒灌浆不密实检测中的研究与应用，为装配式混凝土结构的质量控制提供了直观、科学的技术支撑。该方法能够在不破坏结构的情况下对浆体密实度、缺陷形态及分布进行准确识别，弥补了传统检测方式在精度与覆盖率方面的不足。试验与工程实践表明，内窥镜技术不仅操作灵活、成像清晰，还能与图像处理、数据分析相结合，形成可靠的质量评价体系。随着该方法的推广与规范化，其在装配式混凝土结构中的应用价值将更加突出，为提高结构安全性和耐久性提供了坚实保障。