

# 预制混凝土管片表面气孔问题分析与处置

李迎春<sup>1</sup> 张红茹<sup>2</sup> 张天雨<sup>2</sup> 张轩宁<sup>3</sup> 左文杰<sup>3</sup>

1.无锡地铁建设有限责任公司 江苏 无锡 214000

2.无锡天盈建筑科技有限公司 江苏 无锡 214100

3.无锡天盈工程质量检测有限公司 江苏 无锡 214177

**【摘要】**：预制混凝土管片表面检出气孔缺陷，此类缺陷不仅影响管片外观、增加修补成本，还会降低混凝土密实度与结构耐久性。为解决该问题，项目开展专项溯源排查，从人员、设备、原材料、方法工艺、环境五大维度进行全面分析与检测验证，结果表明原材料、环境因素无异常，核心诱因因为夜间作业新员工未规范执行振捣工艺、振捣设备存在故障隐患、脱模剂喷涂工艺缺乏标准化管控。针对问题根源，制定并实施了人员操作闭环整改、设备专项检修、脱模剂喷涂工艺标准化、缺陷管片分级修补等立即整改措施，经试生产验证，整改后管片大气孔消除率 100%，小气孔指标达标，符合规范要求。在此基础上，进一步提出人员动态管控、设备与工艺标准化固化、原材料内控强化等长效防控建议，形成全流程质量管控体系，从源头杜绝同类气孔问题重复发生，保障预制混凝土管片的生产质量与工程应用安全性。

**【关键词】**：预制混凝土管片；表面气孔；成因分析；振捣工艺；脱模剂；质量管控；无锡地铁

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.030

## 1 问题描述

2025年11月18日无锡地铁6号线02标管片生产过程中，质检人员对管片开展外观检测时，发现预制混凝土管片表面出现气孔缺陷问题。针对该问题，我司立即启动专项调查，开展原因分析，制定针对性处置措施以解决气孔问题，减少气孔的产生。

## 2 产生原因

混凝土管片表面出现气孔的主要原因是：混凝土搅拌浇筑过程中夹带进空气以及水化反应产生的气体，在混凝土初凝前无法通过振捣等方式顺利排出、穿越模板界面，最终滞留于混凝土与模板的接触面，硬化后形成气孔缺陷。针对本次气孔问题，我司进行溯源排查，通过现场生产记录、人员询问、原材料全项检测、现场工艺及试生产验证，逐一明确各因素的影响程度，具体分析如下：

(1) 人员因素：振捣工艺的振捣顺序、振动时长、分层浇筑与振捣的配合、不同部位的差异化控制，完全依赖作业人员的操作规范性与把控能力，是决定混凝土内部气体能否顺利排出的核心因素。

(2) 设备因素：设备因素分为搅拌设备与附着式气动振捣设备两大核心模块，两类设备的性能状态直接影响混凝土拌合物均匀性与气体排出效果。

### 2.1 原材料因素

混凝土各原材料的性能指标，直接影响浆体黏度、和易性、含气量，进而决定气泡在浆体中的上升逸出阻力，是管片表面气孔产生的基础影响因素。本次排查针对水泥、粉煤灰、碎石、砂、外加剂五大原材料，逐一核查质保书、第三方复试报告、自检报告，开展平行对比试验，具体分析如下：

### 2.1.1 水泥

水泥的细度、比表面积、标准稠度用水量，直接影响混凝土浆体的黏度与气泡逸出阻力。若水泥颗粒过细，比表面积增大，需水量增加，相同水胶比条件下浆体黏度会显著升高，气泡上升阻力增大，导致气泡难以逸出而滞留于混凝土内部及表面。

本项目管片生产所用P·II 52.5硅酸盐水泥，货源固定为马鞍山海螺水泥，本次问题批次水泥的自检及第三方复试结果如下：

序号	参数	GB 175-2023 技术指标	自检 结果	第三方复试 结果	单项 评定
1	比表面积 (m <sup>2</sup> /kg)	300~400	335.4	333.6	合格
2	标准稠度用水量 (%)	/	26.2	26.0	/
3	初凝时间 (min)	≥45	141	135	合格
4	终凝时间 (min)	≤390	199	194	合格
5	安定性 (mm, 沸 煮法)	≤5.0	2.0	合格	合格

排查结论：该批次水泥比表面积处于规范要求的中低水准，各项性能指标稳定，无显著波动，不会导致浆体黏度过大阻碍气泡逸出，水泥因素可基本排除。

### 2.1.2 粉煤灰

粉煤灰的需水量比、细度、烧失量，直接影响混凝土拌合物的黏度、和易性与保水性。若粉煤灰需水量比过高，会直接导致混凝土拌合物黏度增大，气泡在浆体中排出阻力增加，难以顺利逸出至表面破裂，硬化后形成表面气孔；粉煤灰细度偏大、烧失量过高，会进一步加剧浆体黏度上升，放大气孔缺陷

风险。

本项目管片生产所用F类I级粉煤灰，货源固定为国能常州发电有限公司，本次问题批次粉煤灰的自检及第三方复试结果如下：

序号	参数	GB/T 1596-2017 技术指标	自检结果	第三方复试结果	单项评定
1	需水量比(%)	≤95	94	93	合格
2	细度(%, 45μm方孔筛筛余)	≤12.0	7.7	7.8	合格
3	烧失量(%)	≤5.0	2.84	2.96	合格
4	三氧化硫(%)	≤3.0	0.61	0.56	合格

排查结论：该批次粉煤灰各项指标均符合国标规范要求，需水量比处于内控标准范围内，品质稳定，不会导致混凝土浆体黏度异常升高，粉煤灰因素可基本排除。

### 2.1.3 碎石

碎石的针片状含量、颗粒级配、含泥量，直接影响混凝土的空隙率与浆体包裹性。碎石针片状含量超标会增大骨料间的空隙率，导致混凝土拌合过程中需更多浆体填充空隙，同时裹挟空气进入混凝土内部；级配不连续、含泥量超标，会导致混凝土和易性下降，气泡逸出通道受阻，诱发气孔缺陷。

本项目管片生产所用(5-25)mm连续级配碎石，货源固定为浙江湖州，本次问题批次碎石的自检及第三方复试结果如下：

序号	参数	JGJ 52-2006 技术指标	自检结果	第三方复试结果	单项评定
1	针片状含量(%)	≤15	2	2	合格
2	含泥量(%)	≤1.0	0.2	0.2	合格
3	压碎指标(%)	≤20	4.6	4.2	合格
4	颗粒级配	5-25连续级配	符合	符合	合格
5	泥块含量(%)	≤0.2	0	0	合格

排查结论：该批次碎石形态良好，级配连续，各项指标均符合规范要求，不会导致混凝土裹挟空气、气泡逸出受阻，碎石因素可基本排除。

### 2.1.4 砂

砂的细度模数、含泥量、颗粒级配，对混凝土浆体富余度、黏度与气泡逸出效果有显著影响。若细度模数偏小，砂粒过细，需浆量增多，浆体黏度上升，气泡排出会受阻；若含泥量超标，混凝土坍落度会变小，黏度也会增加，黏土会吸水并包裹气泡，阻碍气泡破裂逸出。

本项目管片生产所用洞庭湖II区中砂，本次问题批次河砂的自检及第三方复试结果如下：

序号	参数	JGJ 52-2006 技术指标	自检结果	第三方复试结果	单项评定
1	细度模数	2.3-3.0	2.6	2.5	合格
2	含泥量(%)	≤2.0	1.0	0.9	合格
3	颗粒级配	II区中砂	符合	符合	合格
4	泥块含量(%)	≤0.5	0	0	合格

排查结论：该批次河砂为中砂，细度模数适中，含泥量符合规范要求，品质稳定，可排除河砂因素导致的气孔问题。

### 2.1.5 外加剂

聚羧酸减水剂与水泥、粉煤灰等胶凝材料的适应性，减水剂的引气组分、含气量指标，直接影响混凝土的含气量与气泡稳定性。若聚羧酸减水剂与胶凝材料适应性不良，会引入过量不稳定大气泡；引气型外加剂掺量控制不当，会显著增加混凝土含气量，导致气孔增多；外加剂掺量不足，会导致混凝土和易性差，浆体包裹性不足，气泡无法顺利聚集逸出。

本项目管片生产所用标准型聚羧酸高性能减水剂，货源固定为江苏苏博特新材料股份有限公司，不含引气成分，本次问题批次外加剂的自检及第三方复试结果如下：

序号	参数	GB 8076-2008 技术指标	自检结果	第三方复试结果	单项评定
1	减水率(%)	≥25	27	29	合格
2	含气量(%)	≤6.0	2.7	2.6	合格
3	泌水率比(%)	≤60	19	21	合格
4	含固量(%)	16.10×(1±10%)	15.99	16.02	合格

排查结论：该批次外加剂不含引气成分，含气量远低于规范限值，与胶凝材料适应性良好，各项性能指标符合规范要求，可排除外加剂引入过量气泡导致的气孔问题。

## 2.2 方法工艺因素

混凝土拌合、脱模剂涂刷、浇筑振捣、抹面养护等生产工艺的规范性，是决定管片表面气孔缺陷的工艺因素，本次排查针对各关键工艺逐一开展验证，具体如下：

### 2.2.1 混凝土拌合工艺

混凝土拌合的搅拌时长、投料顺序、拌合物坍落度控制，直接影响混凝土的和易性、浆体黏度、包裹性，进而决定气泡在浆体中的上升逸出阻力，是管片表面气孔产生的基础工艺影响因素。其中，混凝土坍落度、和易性的精准控制，是影响气泡逸出效果的核心指标，不同坍落度区间对管片气孔的影响差

异显著。

若搅拌时间过短，会导致混凝土拌合物搅拌不均匀，浆体与骨料包裹性差，坍落度波动大，易包裹气体形成气泡；搅拌时间过长，会使拌合物引入过量空气，同时出现离析，坍落度异常升高，易形成气泡；投料顺序混乱，未按规范顺序投料，易造成外加剂局部聚集，浆体不均匀，坍落度波动失控，也会导致气泡产生。

本次问题专项核查结果：我司搅拌站采用自动化计量系统，投料顺序严格按照“碎石-砂-水泥-粉煤灰-水（外加剂）”的规范工艺执行，搅拌时间不低于90s，符合规范要求；问题批次混凝土现场实测坍落度为70mm，和易性良好，无离析、泌水现象，可排除拌合工艺因素导致的气孔问题。

### 2.2.2 脱模剂涂刷工艺

脱模剂的类型选择、兑水稀释比例、涂刷均匀性、成膜质量，直接决定混凝土界面气泡的逸出效果，是管片表面密集小气孔产生的核心影响因素，不同类型脱模剂、不同配比、不同操作方式对气孔的影响差异显著。

### 2.2.3 混凝土浇筑与振捣工艺

浇筑速度、分层厚度、下料位置，与振捣的启停顺序、振捣时长、振捣器组合模式的匹配度，是振捣工艺控制气孔的核心。浇筑速度过快、一次性下料高度过高，会使混凝土对模板产生冲击，卷入大量空气，同时下层混凝土气体尚未逸出即被上层覆盖，形成封闭气泡；分层浇筑与振捣顺序不匹配、振捣器组合模式不当，会导致振动能量无法有效传递，混凝土内气体无法顺利排出；振捣时长把控不当，欠振导致排气不充分，过振导致离析气泡聚集，均会直接诱发气孔缺陷。

本次问题核查结果：我司管片浇筑采用龙门吊配合料斗进行，明确要求分三次浇筑，每一层浇筑完要预留气泡排气时间，确保每次下料间隔时间，使混凝土在模具内均匀布置，浇筑工艺参数符合JC/T 2030-2010《预制混凝土衬砌管片生产工艺技术规程》要求。但现场实操中，涉事班组未严格执行“浇筑-振捣”配套工艺，下料与振捣顺序错位，第一层下料完成后未及时开启振捣器，待第二层下料完成后才开启整体振捣，导致下层混凝土内的气体被上层覆盖，无法顺利逸出。振捣时长无差异化控制，平直段与转角、螺栓孔部位采用相同的振捣时长，复杂部位振动能量不足，气体无法充分排出。未执行“边下料边辅助振捣”的要求，导致混凝土下料时裹挟的空气无法及时排出。

## 3 整改措施

(1) 人员操作闭环整改：立即暂停涉事1名新进场振捣工的夜间独立作业资格，由振捣实操经验丰富的班组长进行一对一实操带教，重点强化分层浇筑与振捣的时序配合、不同部位振捣时长的差异化控制、振捣器组合启停模式等，明确量化

操作标准：严格执行“分层下料、分层振捣”要求，第一层下料至模具底板后，立即开启振捣器振捣，待表面泛浆、无大量气泡逸出后停止，再进行第二层下料；第二层下料至侧模凸起底部后，开启振捣器振捣，并延长振捣时长5-10s；第三层下料至顶面后，开启振捣，以混凝土表面停止沉落、气泡不再显著逸出、表面均匀泛浆为准，严禁欠振、过振。

(2) 振捣设备专项整改：立即对所有管片钢模的附着式振捣器开展全面排查整改，消除振捣盲区；对松动、损坏的振捣器安装螺栓进行紧固更换，对激振力衰减、频率异常的振捣器立即更换，确保同组振捣器振动频率、激振力同步；对模具刚度、拼缝进行全面校验，对变形、刚度不足的部位进行加固，避免振动能量衰减。完善设备日常检查制度，将振捣器安装紧固度、激振力、频率同步性、振捣器完好性纳入每日检查项目，检查不合格的模具严禁投入生产，每月开展全面维保与性能校验。

(3) 脱模剂喷涂工艺专项标准化整改：立即组织技术人员驻场指导，制定《脱模剂喷涂专项作业指导书》，明确全流程量化操作标准。材料配比：水性脱模剂固定采用1:3兑水稀释比例，机械搅拌均匀后使用，严禁使用隔夜稀释液；喷涂距离模板面30-50cm，垂直于模板面匀速交叉喷涂2遍；边角处理：模板转角、螺栓孔模具部位，喷涂后用毛刷均匀补涂，确保无漏涂、无积油；喷涂完成后静置(10-20)min，待脱模剂完全成膜后，方可进入下道工序，有流坠积聚的脱模剂立即用海绵清理干净，确保模板表面形成均匀连续薄膜，无流坠、漏涂现象。喷涂作业固定专人专岗，岗前必须完成专项培训考核，合格后方可上岗，严禁非专业人员随意操作。

(4) 缺陷管片分级闭环修补处置：针对已有气孔缺陷的管片，依据T/JSTJXH6-2022《城市轨道交通工程盾构管片预制及拼装技术标准》要求，制定分级修补方案，全程留痕、闭环管理，所有修补管片均需经监理验收合格，建立专项修补台账，实现质量全追溯，未验收合格的管片严禁出厂。

## 4 技术验证

为验证整改措施的有效性，我司选取整改完成后的同批次模具、原配合比，严格执行整改后的振捣工艺标准与脱模剂喷涂规范，开展连续三模管片试生产，对管片成品外观质量进行检测，对气孔分布位置、直径、深度、密度进行量化统计，验证结果如下，试生产的3模管片，无直径>3mm的大气孔，大气孔消除率100%；管片表面小气孔直径均≤2mm，分布密度低，无连片麻面现象；管片外观质量符合GB/T 22082-2024规范要求，整改措施通过技术验证，正式全面落地执行。

## 5 总结

为彻底消除管片表面气孔隐患，建立长效质量防控机制，从源头杜绝同类问题重复发生，制定以下常态化、可落地的改

进措施:

(1) 人员能力提升与动态管控,建立周期性人员管理体系,新进人员必须完成“理论培训+跟岗实操+考核上岗”三级流程,理论考核 $\geq 90$ 分、实操连续3模管片质量达标,方可独立上岗;考核不合格人员立即停岗复训;将管片气孔发生率等质量指标与个人绩效、班组薪酬直接挂钩。

(2) 振捣设备与工艺全流程标准化管控固化《管片振捣作业指导书》,明确分层浇筑与振捣的时序配合、不同部位振捣时长、振捣器启停组合模式的全流程量化标准,严禁随意调整;每季度根据原材料性能、季节变化,开展振捣工艺参数优化试验,固化最优参数;完善设备预防性维护体系,将振捣器

检查、维保、校验责任落实到人,确保设备状态稳定。

(3) 脱模剂喷涂工艺常态化标准化管控固化《脱模剂喷涂作业指导书》,明确稀释比例、喷涂参数、成膜时间、验收标准的全流程量化要求,严禁随意调整;喷涂作业人员固定专人专岗,岗前必须完成专项培训考核,合格后方可上岗,从工艺上杜绝气泡滞留隐患。

(4) 原材料进场质量全周期严控原材料进场除按规范完成常规复试外,建立项目内控质量标准,重点关注水泥比表面积、粉煤灰需水量比等影响混凝土黏度与排气性能的关键指标,超标准的原材料严禁进场,保证混凝土和易性与振动排气性能稳定,避免因材料适应性问题引入过量气泡。

### 参考文献:

- [1] GB 175-2023,通用硅酸盐水泥[S].
- [2] GB/T 1596-2017,用于水泥和混凝土中的粉煤灰[S].
- [3] JGJ 52-2006,普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准[S].
- [4] GB 8076-2008,混凝土外加剂[S].
- [5] JC/T 2030-2010,预制混凝土衬砌管片生产工艺技术规程[S].
- [6] GB/T 22082-2024,预制混凝土衬砌管片[S].