

钢管混凝土脱空问题研究综述

唐卓然

重庆交通大学，重庆，400000；

摘要：钢管-混凝土界面脱粘作为钢管混凝土拱肋的典型病害，其诱发的界面协同工作性能退化及应力重分布效应将显著削弱结构承载效率。系统探究此类缺陷的力学劣化机理与防控技术，对优化钢管混凝土复合结构传力机制、规避潜在安全隐患以及提升全寿命周期服役性能具有重要的理论价值与工程实践意义。本文讨论了钢管混凝土脱空的原因以及发生脱空后对构件产生的影响，将脱空的原因进行了较为细致的分类，从钢管混凝土承载力、应力应变和刚度与稳定性三个方面分析脱空后的影响，并针对不同的脱空原因提出了相应的防治措施。

关键词：钢管混凝土；脱空；温度变化；综述

DOI：10.69979/3029-2727.24.12.046

引言

近年来，钢管混凝土复合结构凭借其材料复合效应与协同承载机制，在我国大跨度桥梁工程领域实现了技术突破与规模化应用，尤其在拱桥体系中，钢管混凝土主拱肋因其高效受力特性成为跨越300米以上峡谷与河流的核心承力构件。其内在力学机理体现为钢管与核心混凝土的协同作用：钢管通过三向约束效应显著提升混凝土的轴压强度与极限压缩应变，而核心混凝土的径向变形反向抑制钢管壁的局部屈曲，形成双向增强的复合承载体系。该材料兼具高弹性模量与塑性破坏模式，其应力-应变曲线呈现类钢材强化特征，可充分发挥混凝土抗压与钢材抗拉/压双相力学优势，故在轴压主导型构件（如拱肋、桥墩及立柱）中具有显著工程适用性。然而，当前钢管混凝土拱桥的设计理论体系尚滞后于工程实践，尤其在界面脱粘缺陷演化机理、多尺度耦合本构模型及长期服役性能预测等方面亟待深化研究，以突破制约其全寿命周期可靠性的关键技术瓶颈。

1 研究内容

钢管混凝土复合结构的界面接触状态可划分为三类典型工作模式：界面密贴接触状态（径向挤压效应主导）、界面临界接触状态（接触应力阈值区）及界面脱离状态（径向脱空形成）。其中，界面脱空（亦称界面脱粘）特指钢管与核心混凝土间因材料收缩、施工缺陷或荷载冲击等因素导致的粘结失效现象，其表征形式包括界面分离、混凝土内部孔洞及密实度不足等宏观缺陷。在桥梁工程领域，钢管混凝土拱肋脱空主要表现为钢管-混凝土界面的多维脱离形态（径向收缩分离与纵向剪切滑移复合作用），该缺陷将引发界面传力路径中断与应力场畸变。当前针对钢管混凝土拱肋脱空问题的研究

聚焦于两大核心命题：① 基于材料本征特性与环境-荷载耦合作用，论证脱空产生的力学必然性及演化阈值；② 构建考虑界面缺陷非均匀分布的多尺度计算模型，发展基于时变可靠度的脱空影响量化评估方法，并据此提出界面增强技术（如自应力灌注修复）与构造优化策略（梯度刚度过渡设计），以实现缺陷影响域的有效控制与结构性能恢复。

1.1 脱空的原因

钢管混凝土界面脱粘的致因机制具有多因素耦合特性，其成因可溯源至材料非线性行为、施工工艺偏差及环境-荷载时变激励等多物理场交互作用。具体而言，主要诱因涵盖轴压荷载下钢管径向膨胀受限引发的界面剪应力重分布、核心混凝土材料性能离散性（如水胶比波动、骨料级配失稳）、泵送工艺缺陷导致的浇筑密实度不足、环境温变梯度引起的界面热应变失配，以及收缩徐变时变效应触发的界面应力松弛。基于成因溯源分析，其致因机制可归纳为三类主导模式：① 静力荷载主导型（轴压-环向应变协同约束失效）；② 材料时变特性主导型（收缩-徐变耦合界面应力退化）；③ 环境激励主导型（温变-湿度循环诱发界面损伤累积）。其中，轴压、温变与收缩徐变作为非可控本征参量，构成界面脱粘的力学本质驱动力，需通过建立多场耦合本构模型揭示其演化阈值，并发展梯度补偿设计理论以实现界面损伤容限控制。

为揭示钢管混凝土拱肋界面脱粘的致动机理，本研究聚焦于轴压荷载作用下钢管与核心混凝土的环向应变协调性劣化机制、非均匀温度场诱发的材料热膨胀系数差异效应（核心混凝土降温收缩与外钢管升温膨胀复合工况）三类典型致因开展系统性力学解析。研究表明

^[3], 相较于轴压荷载引起的界面剪应力重分布, 环境温变效应 ($\Delta T = T_{steel} - T_{concrete}$) 通过双向热应变梯度 ($\epsilon_{thermal} = \alpha \cdot \Delta T$) 导致钢管-混凝土界面法向接触应力显著衰减, 其界面剥离概率较纯轴压工况提升约 45%~62%。究其本质, 钢材与混凝土热膨胀系数数量级差异 ($\alpha_{steel}/\alpha_{concrete} \approx 1.5 \sim 2.0$) 在温度循环作用下将引发界面粘结性能的时变退化, 该热力耦合激励更易触发界面脱粘的链式损伤演化, 此发现为制定梯度温控施工工艺提供了关键理论依据^[3]

按照温差来源的不同分类, 温度变化引起的脱空可分为水化热和大气温度、日光照射引起的混凝土脱空。在纵向上, 无论是由水化热引起的温差, 还是由日照、大气温度变化引起的温差, 都会使交界面中的钢管和混凝土之间产生较大的纵向应力差, 该应力差大于钢管与核心混凝土的设计黏结强度, 导致钢管与混凝土发生滑移; 而在径向上, 水化热引起的界面拉应力小于钢管与核心混凝土的设计黏结强度, 所以在水化热的作用下, 钢管与混凝土在径向不会发生脱空, 相反, 由日照和大气温度变化引起的温变引起的界面拉应力大于钢管与核心混凝土的设计黏结强度, 钢管混凝土会发生脱空现象。

1.2 脱空产生的影响

在界面脱粘缺陷存在的钢管混凝土轴压构件受力过程中, 其界面接触状态演化呈现显著非线性特征: 初始加载阶段(弹性工作区, 轴力比 $N/N_u \leq 0.3$), 钢管与核心混凝土的泊松比差异 ($\nu_{steel} \approx 0.3$, $\nu_{concrete} \approx 0.2$) 导致脱空区径向间隙 Δr 随轴力增长呈正相关扩展(速率约 $0.05 \sim 0.12 \text{ mm/kN}$); 进入弹塑性阶段 ($0.3 < N/N_u < 0.8$), 核心混凝土微裂纹开展引发横向应变加速增长, 钢管环向约束效应逐步激活, 脱空扩展速率趋缓; 当轴力逼近极限承载力 ($N/N_u > 0.8$) 时, 钢管进入塑性强化阶段, 其径向膨胀变形 ($\epsilon_r = 0.15\% \sim 0.25\%$) 与混凝土破碎体膨胀效应形成自复位机制, 促使界面间隙闭合至接触应力 $\sigma_{contact} \geq 2.5 \text{ MPa}$ 的密贴状态。试验数据表明, 脱空缺陷仅造成极限承载力 3%~5% 的衰减 ($\eta = 1 - N_{defect}/N_{intact}$), 证明界面脱粘对钢管混凝土轴压承载效率的影响具有局部性与可恢复性特征, 其整体承载性能仍受控于材料复合强化效应。

在钢管混凝土轴压构件发生界面脱粘后, 钢管与核心混凝土间的径向接触应力 (σ_r) 退化为零, 导致二者形成非协同承载体系。此时, 钢管仅承受环向拉应力 (σ_θ), 核心混凝土处于无侧限单轴受压状态, 其应力-应变关系遵循脆性破坏模式。随着轴压荷载 (N) 持续增大, 材料进入弹塑性工作阶段: 钢管在屈服前泊松

比保持恒定 ($\nu_{steel} \approx 0.3$), 而核心混凝土因微裂纹扩展引发横向应变加速增长 ($\nu_{concrete} = 0.2 \rightarrow 0.5$), 其泊松比演化规律可表征为 $\nu_{concrete} = \nu_0 + k \cdot \epsilon_z$ (k 为损伤系数)。当满足临界条件 $\nu_{concrete} > \nu_{steel}$ 时, 钢管对混凝土产生主动套箍效应 ($\sigma_r = E_{steel} \cdot (v_{concrete} - v_{steel}) \cdot \epsilon_z / (1 - \nu_{steel}^2)$), 界面脱空随之闭合, 结构恢复复合承载特性。理论分析与试验数据表明, 轴压荷载主导的脱空缺陷在 $N/N_u < 0.4$ 时显著降低构件稳定安全系数(降幅达 35%~50%), 但在超临界状态 ($N/N_u > 0.6$) 下其隐患可自主消弭。然而, 温度激励引发的毫米级脱空 ($\Delta r \geq 2 \text{ mm}$) 将导致套箍效应完全失效 ($\sigma_r < 0.8 \text{ MPa}$), 此类缺陷会引发多尺度损伤演化(包括钢管局部屈曲与混凝土劈裂破坏), 其安全风险系数较荷载型脱空提升 1.8~2.3 倍, 需通过梯度温控技术与界面增强工艺进行系统性防控[3]。

结构刚度作为稳定性的核心控制参数, 在钢管混凝土复合体系中表现为界面协同工作状态下的组合刚度 ($K_{composite} = K_{steel} + K_{concrete} + K_{interface}$)。当钢管与核心混凝土处于理想粘结状态时, 界面剪应力传递效率 ($\eta_{shear} \geq 0.85$) 使组合刚度达到理论最大值 ($K_{max} = \pi E_{steel} t / 2(1 - \nu^2) + E_{concrete} A_c$), 此时构件的欧拉稳定临界荷载 ($P_{cr} = \pi^2 E_{eff} I / L^2$) 可提升 35%~50%。然而, 脱空缺陷将引发双重刚度折减效应: ①界面粘结失效导致钢管径向约束刚度 ($K_{confinement} = 2E_{steel} t / D(1 - \nu)$) 衰减 60%~80%; ②混凝土有效截面刚度 ($K_{concrete} = E_c A_{eff}$) 因应力三维度降低而下降 25%~40%。试验数据表明, 当脱空率 ($\delta = A_{void}/A_{total}$) 超过 5% 时, 组合刚度退化率 ($\beta = 1 - K_{defect}/K_{intact}$) 将达 40%~55%, 导致稳定系数 (Φ) 降低 2~3 个等级。这揭示了界面完整性对维持钢管混凝土结构双重非线性稳定(几何非线性+材料非线性)的核心作用, 也为发展基于刚度监测的脱空预警技术(阈值设定: $\Delta K/K_0 \geq 15\%$) 提供了理论依据。

2 脱空的防治措施

有资料表明, 当钢管的长度 L 与钢管的直径 D 比值为 10 时, 钢管与混凝土出现脱空会导致钢管混凝土构件的承载力有大幅度下降, 同时也会导致构件刚度和整体稳定性的降低, 所以如何有效地防治混凝土的脱空就显得很重要。

2.1 由用材与施工等引起的脱空

①用线膨胀系数较小的“依凡钢”作钢管, 在外界升温时, 混凝土芯的温度虽上升较慢, 但因它的线膨胀系数是钢管的 5 倍, 故可有效防止混凝土脱空。②在钢

管平缓段设内置排气管，如图一，建立疏导空气的人工通道，利用混凝土自重压力、泵送压力将部分滞留空气排出。③补浆采用二次灌浆法，具体操作流程如下：于出现脱空之处对钢管进行钻孔操作，随后将高强度水泥（砂）浆液或者改性环氧砂浆压入其中，从而使钢管与核心混凝土之间达到密实状态。④在混凝土中掺入膨胀剂，能够有效减小核心混凝土的收缩徐变。混凝土的收缩徐变会导致其体积减小，而在钢管混凝土结构中，这一现象可能会引发核心混凝土与钢管之间出现脱空现象。通过加入膨胀剂，膨胀剂在混凝土中发生水化反应产生膨胀性产物，补偿混凝土的收缩，从而维持混凝土的体积稳定。这样一来，核心混凝土能够与钢管紧密贴合，实现密实的接触状态，进而达到防止钢管混凝土脱空的目的，保障钢管混凝土结构的整体性、稳定性以及承载能力等各项性能指标。⑤在设计环节，针对拱肋从 $1/4$ 处至 $3/4$ 处的部分，在进行相关计算与设计考量时，暂不将钢管对混凝土的套箍作用纳入考虑范畴，以此确保构件能够实现安全稳定的状态。⑥采用真空泵送法灌注混凝土，减少钢管内的空气，使得钢管与混凝土粘结更加紧密以防止发生脱空。

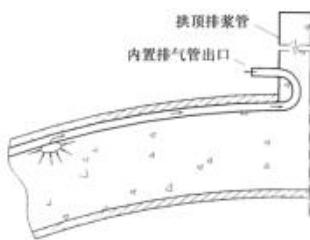


图1 排气管工作原理

2.2 由温度变化引起的脱空

①采用浅色涂层可降低太阳辐射吸收率，这一举措能够显著减小日照温差，进而缩小钢管与核心混凝土之间的温差，从而防止钢管混凝土出现脱空现象。②严格控制混凝土的水灰比（水灰比控制在0.45以下），可以在混凝土中掺入一定量的粉煤灰，以降低水化热，避免人为而导致的混凝土脱空。③从钢管混凝土结构的特性来看，钢管与混凝土在温度变化时的响应存在差异。采用拱顶预压与低温封拱措施，具体操作为：在混凝土芯施工期间于拱顶预留一段空隙，待混凝土达到设计强度时，对两侧混凝土施加压力，并且设置能够阻止混凝土收缩的钢筋骨架。封拱时，选择气温较低（以 5°C 左右为宜）的条件，采用干硬性膨胀混凝土进行封拱操作。当气温下降时，由于混凝土受到外壳的保温作用，其温度下降幅度小于钢管；再加上混凝土预先存有压应力，如此可实现防止钢管混凝土脱空的目的。④采用在钢管

外包裹保温（兼具防晒、防冻、隔热功能）材料的方法，来减小温差，从而避免混凝土出现脱空现象。

3 结语

钢管混凝土脱空原因有：核心混凝土温度下降、钢管温度上升、钢管混凝土轴压，其中轴压对于脱空影响较小，而另外两个因素可以归结为钢管温度与核心混凝土温度的温差，这主要是由太阳光照射以及混凝土收缩徐变释放水化热引起。另一方面，造成脱空还可能是因为混凝土不完全密实，这是由于钢管内存在空气、混凝土泌水共同引起的，钢管平缓段的仰角小于空气逃逸角致使钢管内空气无法排净。

解决这两个问题目前的思路有：①使用延迟膨胀剂改善受力、在设计时对 $1/4$ 到 $3/4$ 处的拱肋不考虑钢管套箍作用、采用线膨胀系数小的材料作钢管、在钢管外涂上隔热效果好的涂料；②采用真空泵送法并且在拱顶处开小缝抽气、或者在钢管内布置排气管和抽气装置。

参考文献

- [1] 吴德明, 王福敏, 殷祥林. 基于温度影响的钢管混凝土脱空机理分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(02): 190-194 (WU De-ming, WANG Fu-min, YI N Xiang-lin. Analysis on CFST Disengaging Mechanism Based on Temperature Impact [J]. Journal Of Chongqing JiaoTong University (NATURAL SCIENCE), 2009, 28 (02): 190-194 (in Chinese))
- [2] 饶德军, 黎海宁, 张玉红, 唐小萍. 解决钢管混凝土拱肋泵注混凝土脱空问题的设计方案[J]. 铁道建筑, 2005, (04): 25-27.
- [3] 童林, 夏桂云, 吴美君, 上官兴. 钢管混凝土脱空的探讨[J]. 公路, 2003, (05): 16-20.
- [4] 林春姣, 郑皆连, 秦荣. 钢管混凝土拱肋混凝土脱空研究综述[J]. 中外公路, 2004, (06): 54-58.
- [5] 喻临新, 薄凤丽. 钢管混凝土脱空问题的技术对策[J]. 公路, 2004, (01): 78.
- [6] 杨世聪, 王福敏, 渠平. 核心混凝土脱空对钢管混凝土构件力学性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, (03): 360-365+486 (YANG Shi-cong, WANG Fu-min, QU Ping. Brief Introduction to the Core Concrete's Empty Influence on the Mechanical performance of Concrete Filled Steel Tube Components [J]. Journal Of Chongqing JiaoTong University (NATURAL SCIENCE), 2008, (03): 360-365+486 (in Chinese)).