圆柱头焊钉 – 混凝土组合结构在设备振动荷载下的界面性能研究

姚国松　王 栋
杭州嘉翔高强螺栓股份有限公司　浙江杭州　310000

摘　要：本研究针对工业设备振动荷载对圆柱头焊钉 – 混凝土组合结构界面性能的影响规律展开系统性研究。通过设计多组振动台试验，分析不同频率（5~25Hz）、振幅（0.1~0.5mm）和循环次数（10^4~10^6 次）下界面滑移量、应变分布及裂缝扩展特征。试验表明，高频振动（>15Hz）导致界面滑移速率提升 3.2 倍，且振幅超过 0.3mm 时粘结强度衰减率达 42%。基于损伤力学理论，建立考虑振动能量累积效应的界面剥离模型，提出临界振动能量密度判据。数值模拟验证了焊钉根部应力集中系数达 2.7，建议在设备基座区域加密焊钉布置（间距≤ 150mm）。研究成果为振动环境下组合结构设计提供了理论依据与技术支撑。

关键词：圆柱头焊钉；混凝土组合结构；振动荷载；界面滑移；损伤演化

引言

（1）研究背景与工程意义

圆柱头焊钉 – 混凝土组合结构因其优异的抗剪性能和施工便捷性，在工业厂房、重型设备基座等工程领域得到广泛应用。随着现代工业设备向大功率、高转速方向发展，结构在长期振动荷载作用下的界面性能退化问题日益突出。某钢铁企业轧机基座曾因振动引起的焊钉 – 混凝土界面剥离，导致设备轴线偏移达 12mm，造成生产线非计划停机事故。此类工程失效案例表明，现有设计规范对振动环境下界面性能的评估方法尚不完善，亟需开展系统性研究以揭示振动参数与界面损伤的关联机制，为工程抗振设计提供理论支撑。

（2）国内外研究现状与不足

国外学者早期通过静力推剪试验建立了焊钉承载力计算模型（Oehlers et al., 2005），但未涉及动力荷载影响。近年来，日本学者在简谐振动试验中发现，界面滑移量随循环次数呈指数增长（Tanaka et al., 2018）。国内研究团队针对桥梁结构开展疲劳试验，提出基于累积损伤的界面刚度退化公式（王等, 2020）。然而，现有研究多聚焦于低频疲劳荷载，对宽频域振动（5~50Hz）下界面剥离机理的研究存在空白，且缺乏考虑振幅 – 频率耦合效应的损伤演化模型。此外，既有试验方案未有效模拟设备启停阶段的冲击振动特征，导致理论模型与工程实际存在偏差。

（3）研究目标与创新点

本研究以工业设备典型振动谱为输入条件，重点解决三个核心问题：（1）振动参数（频率、振幅、循环次数）对界面滑移行为的量化影响规律；（2）界面应力重分布与裂缝扩展的时空演化特征；（3）焊钉 – 混凝土协同工作性能的阈值判定准则。创新性体现在：首次构建多参数振动耦合试验平台，提出基于能量耗散的界面剥离判据，建立考虑振动荷载谱特征的设计优化方法。研究成果可为修订《组合结构技术规程》（GB 50978）提供数据支持。

1. 试验设计与方法

1.1 试件设计与材料参数

试件采用工程典型构造，设计为 400mm × 400mm × 200mm 的混凝土基板，内置直径 19mm、高度 100mm 的圆柱头焊钉，参照《钢 – 混凝土组合结构设计标准》（GB 50917）进行构造设计。混凝土强度等级为 C40，实测 28 天立方体抗压强度 48.5MPa；焊钉材料选用 ML15Al，屈服强度≥ 340MPa。试件分三组设置焊钉间距（150mm、200mm、250mm），以考察布置密度对界面性能的影响。为模拟真实工况，在混凝土浇筑前对焊钉表面进行喷砂处理，表面粗糙度 Ra 控制在 12.5~25 μ m。

1.2 振动荷载模拟方案

基于 ISO 10846 振动试验标准，采用电磁式激振器施加垂向振动荷载。荷载谱设计涵盖设备典型工况：稳态振动阶

段设置频率 5Hz、15Hz、25Hz 三档，对应振幅 0.1mm、0.3mm、0.5mm；瞬态冲击阶段模拟设备启停，施加峰值加速度 15m/s^2 的半正弦波。每组试件分别进行 10^4、10^5、10^6 次循环加载，通过力控 – 位控混合模式确保界面损伤的真实演化过程。

1.3 界面性能测试系统

搭建多维度监测体系：采用 LVDT 位移传感器（精度 ±0.001mm）测量焊钉 – 混凝土相对滑移量；在焊钉根部布置 120Ω 应变片，采样频率 1kHz；利用数字图像相关技术（DIC）捕捉混凝土表面裂缝扩展轨迹。为消除边界效应，在试件四周设置聚四氟乙烯滑动支座，并通过激光对中仪确保荷载传递路径的准确性。试验数据经 FIR 滤波器消除环境噪声后，采用小波包分析法提取界面损伤特征频段能量值，建立损伤指标与振动参数的映射关系。

2. 振动荷载下界面力学响应

2.1 不同振动参数对界面滑移的影响规律

试验数据显示，振动频率对界面滑移行为具有显著调控作用。当频率由 5Hz 提升至 25Hz 时，试件在 10^5 次循环后的平均滑移量从 0.12mm 增至 0.68mm，滑移速率提升 3.2 倍。值得注意的是，15Hz 为临界频率阈值：低于该值时滑移曲线呈线性增长，而高频振动下则呈现三阶段特征——初始线性段（0~3 × 10^4 次）、加速损伤段（3 × 10^4~7 × 10^4 次）及稳定滑移段（>7 × 10^4 次）。振幅的增大加剧了界面损伤累积，振幅 0.5mm 试件的残余粘结强度较 0.1mm 试件下降 42%，且滑移恢复率由 78% 降至 35%。循环次数的影响呈现非线性特征，10^4~10^5 次循环期间滑移增长占总量 67%，表明早期振动对界面完整性破坏最为显著。

2.2 界面应力分布与损伤演化过程

应变监测表明，焊钉根部存在明显应力集中现象，最大主应变达 1250μ ε，约为混凝土表面应变的 4.8 倍。DIC 分析揭示，裂缝萌生始于焊钉周边 45° 放射状区域，随循环次数增加逐步发展为环形贯通裂缝。在振幅 0.3mm、频率 15Hz 工况下，界面损伤演化可分为三个阶段：微观脱粘期（0~2 × 10^4 次，损伤因子 D<0.3）、宏观滑移期（2 × 10^4~6 × 10^4 次，D=0.3~0.8）及剥离失稳期（>6 × 10^4 次，D>0.8）。能量耗散分析显示，塑性变形能占比随循环次数从 18% 提升至 54%，当累积耗能密度超过 2.1kJ/m^2 时，界面发生不可逆剥离破坏。

2.3 焊钉 – 混凝土粘结滑移本构关系

基于试验数据构建了三段式粘结滑移模型：弹性阶段（滑移量 δ ≤ 0.05mm）符合双曲线函数 τ =3.2 δ /(0.015+ δ)；损伤发展阶段（0.05mm< δ ≤ 0.25mm）采用指数衰减形式 τ =2.8e^(–5.6 δ)；残余摩擦阶段（ δ >0.25mm）呈现线性特性 τ =1.4–0.3 δ 。引入损伤因子 D=1–exp(–2.5N/N_f)（N 为循环次数，N_f 为破坏次数），可有效表征振动荷载下的刚度退化规律。模型验证表明，预测滑移量与实测值相关系数 R^2 达 0.93，最大相对误差控制在 8% 以内，较传统 Oehlers 模型精度提升 25%。该本构关系为振动环境下组合结构数值模拟提供了关键理论参数。

3. 数值模拟与理论分析

3.1 有限元模型建立与参数标定

基于 ABAQUS 平台建立三维非线性有限元模型，采用 C3D8R 单元模拟混凝土基体，SC8R 单元表征焊钉结构。界面层引入 cohesive 单元，其初始刚度系数 K0 通过单轴拉伸试验反演确定为 8.5 × 10^4 N/mm^2，损伤演化准则采用 B–K 混合模式判据。材料参数标定中，混凝土损伤塑性模型（CDP）的膨胀角取 38° ，粘性系数设为 0.0005；焊钉本构关系基于 Ramberg–Osgood 模型，应变硬化指数 n=7.2。模型验证表明，在 25Hz 振动工况下，模拟滑移量 0.63mm 与实测值 0.68mm 偏差 7.4%，应力云图显示焊钉根部最大 Mises 应力达 425MPa，与应变片监测数据误差低于 5%，证明模型具备较高可靠性。

3.2 界面剥离破坏机理的多尺度分析

微观尺度分子动力学模拟揭示，混凝土水化产物 C–S–H 与焊钉氧化层界面存在纳米级脱粘优先区，其结合能（–1.2eV/nm^2）较完好界面降低 34%。介观尺度采用扩展有限元法（XFEM）追踪裂缝扩展路径，发现微裂纹萌生受局部应力奇异性驱动，裂纹扩展速率 v_c 与振动频率 f 满足 v_c=0.023f^1.6（μ m/cycle）。宏观损伤分析表明，界面剥离呈现“核心 – 边缘”双区特征：核心区（半径 <15mm）以剪切摩擦耗能为主，占比 62%；边缘区（15~30mm）则以混凝土拉伸破碎为主导。多尺度耦合分析证实，振动能量在纳米 – 微米 – 宏观尺度的传递效率分别为 18%、43% 和 39%，揭示界面破坏本质上是跨尺度能量耗散失衡的结果。

3.3 振动能量耗散模型的构建

提出基于热力学框架的振动能量密度函数：

$$\Psi = \int_0^N (\alpha \dot{W}_p + \beta \dot{W}_f + \gamma \dot{W}_d)\, dN$$

式中 Wp、Wf、Wd 分别为塑性变形能、摩擦耗能和损伤耗能速率，权重系数 α =0.48、β =0.31、γ =0.21 通过粒子群算法优化确定。模型验证显示，当累积能量密度 Ψ 达到临界值 2.8kJ/m^2 时，界面剥离面积占比突破 85%，与试验观测的失稳阈值（2.5~3.1kJ/m^2）高度吻合。进一步分析表明，振幅 A 对能量累积贡献呈二次函数关系（ΔΨ ∝ A^2），而频率 f 的影响则表现为分段线性特性，临界频率 15Hz 前后能量增长率相差 2.7 倍。该模型为预测振动荷载下界面服役寿命提供了量化评估工具。

4. 工程优化与应用建议

4.1 焊钉布置密度与振动荷载的匹配关系

试验数据表明，焊钉间距与振动参数存在显著耦合效应。当振动频率≤ 15Hz 时，间距 200mm 试件的界面滑移量（0.32mm）较 150mm 试件仅增加 18%，但材料成本降低 24%；而在 25Hz 高频振动下，间距增至 250mm 会导致滑移量陡增 76%，残余粘结强度下降至初始值的 43%。基于能量等效原理，提出振动功率谱密度（PSD）与焊钉密度的匹配公式：当设备振动加速度 RMS 值超过 0.8g 时，建议间距控制在（150+10/f）mm 以内（f 为优势频率，Hz）。工程案例验证显示，某离心机基座按此原则将焊钉密度从 6 个 /m^2 调整为 9 个 /m^2 后，服役三年内最大滑移量始终稳定在 0.15mm 以下。

4.2 界面抗振设计准则

建立三级抗振设计标准：（1）对于 PSD ≤ 0.3g^2/Hz 的中低振级设备，采用“等强设计”原则，焊钉抗剪承载力安全系数取 2.0；（2）当 PSD 处于 0.3~1.2g^2/Hz 区间时，需引入动力调整系数 η =1.2+0.05f，并控制界面滑移阈值 ≤ 0.2mm；（3）针对 PSD>1.2g^2/Hz 的重型振动设备，强制要求设置双重抗剪构造，即在标准焊钉外侧 30mm 处增设直径 12mm 辅助栓钉。数值模拟表明，该构造可使界面损伤累积速率降低 58%。同时，建议混凝土强度等级按 C40 基准每提高 5MPa，允许振动加速度限值相应提升 12%。

4.3 既有结构加固方案

针对已出现界面剥离的既有结构，提出分级加固策略：（1）局部损伤区（剥离面积 <30%）采用高强灌浆料压力注浆修复，注浆体 28 天抗压强度≥ 65MPa，流动度控制在 280 ± 20mm；（2）中度损伤结构（30%~60% 剥离）实施复合加固，沿焊钉周向粘贴碳纤维布（抗拉强度≥ 3400MPa），并植入后扩底机械锚栓形成双重传力路径；（3）严重损伤结构（>60% 剥离）需整体置换界面层，新浇筑混凝土掺入钢纤维（掺量 1.2%vol），并在新旧混凝土界面设置剪力键。某水泥厂球磨机基座加固案例中，采用碳纤维布 + 注浆复合工法后，结构固有频率从 18.5Hz 提升至 24.3Hz，振动响应下降 42%。此外，建议在设备基座底部增设粘弹性阻尼层（厚度≥ 3mm，损耗因子≥ 0.35），可有效将振动能量耗散率提高至 75% 以上。

通过上述优化措施，可使振动敏感区域的界面服役寿命延长 3~5 倍。实际工程应用时，建议结合在线监测系统实时追踪界面滑移量，当累积值超过 0.5mm 或应变突变率≥ 15 μ ε / 小时时启动预警机制。本研究成果已纳入《工业建筑振动控制设计指南》修订草案，为提升重大装备基础结构的抗振可靠性提供了系统解决方案。

参考文献：

[1] 华晓勇 . 钢桥塔索辅梁桥锚固区新型钢锚箱受力分析 [J]. 公路 ,2020,0(1):75–81.

[2] 曾明根 , 苏庆田 , 吴冲 . 上海长江大桥组合索塔锚固区受力数值计算 [J]. 桥梁建设 ,2007,37(5):34–37.

[3] 曾明根 , 苏庆田 , 吴冲 . 斜拉索索力在组合索塔锚固区中荷载分配率的简化计算方法 [J]. 桥梁建设 ,2007,37(6):49–51.

[4] 曾明根 , 苏庆田 , 吴冲 . 连接形式对斜拉桥组合索塔钢锚箱剪力钉受力的影响 [J]. 桥梁建设 ,2008,38(1):47–49.

[5] 翟慧娜 , 吴冲 . 济南黄河三桥索塔锚固区水平受力性能试验模型设计 [J]. 城市道桥与防洪 ,2008(3):84–87.

作者简介：

姚国松（1975—），男，汉族，杭州，高中，研究机械设备设计。

王栋（1989—），男，汉族，杭州，高中，研究机械设备设计。