

图 1 阻沙指数 R 变化图

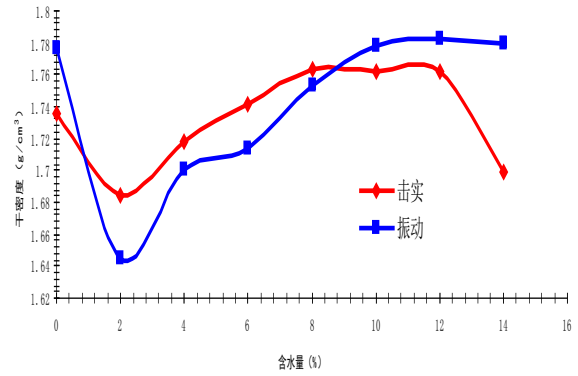


图 3 含水率与干密度变化关系图

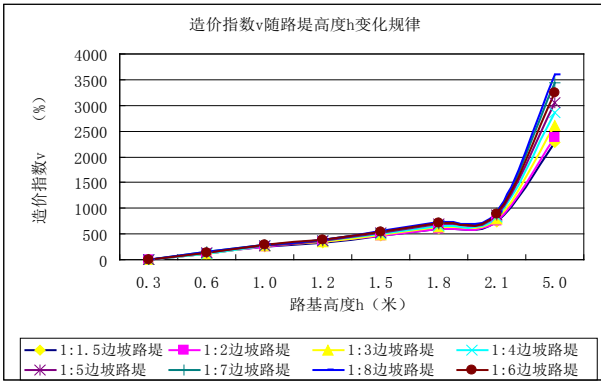


图 2 造价与路堤高度关系图

流动沙漠高速或一级公路，考虑防沙要求，尽量采用分离式路基、缓边坡、取消护栏。干旱流动沙漠地区一般采用 1 : 3 以上缓边坡路基形式，利于防沙。沙漠边缘农田区一般采用风积沙路基包边路基形式。

### 2.3 路基施工

路基宜采用递推法施工：放样—分层推筑沙基—整平压实—铺土工布—铺砂砾垫层—检测沙基顶面压实度—防沙工程—铺设基层面层。

路基正式施工前应做试验路，以取得施工必需的参数。

#### 2.3.1 风积沙作为路基填料

由于沙漠地区较为偏僻，通常缺乏筑路材料，特别是路基填料。通过试验及工程实际，可充分利用风积沙作为路基填料。

通过系统研究风积沙工程特性和强度机理，分析了应力—应变特性，揭示了风积沙含水量、压实度与风积沙路基回弹模量的关系。

试验证明，伴随着干密度的增大，CBR 值明显增大。风积沙的干密度与 CBR 及回弹模量的关系呈现正分布。风积沙的沉降率随着荷载等级的增大而增大，抗剪强度随着风积沙的密度增加，内摩擦角明显增加。通过击实试验证明：风积沙具有干压实和饱水压实两大特性。同时通过风积沙振动压实试验，风积沙振动产生颗粒位移，使沙层的密度有较大提高。风积沙路基填筑干密度与含水率的关系如图 3 所示。

利用上述两个特性，在水源缺乏的沙漠腹地，可采用振动干压实筑路技术来提高路基整体强度与稳定性；在水源丰富的沙漠边缘地区采用饱水湿压实技术。

#### 2.3.2 压实度检测

路基碾压完毕后，干压实沙漠路基按《沙漠公路指南》第 13 章附表 3 的压实度检测方法；洒水压实沙漠路基按《公路路基路面现场测试规程》(JTJ059—95)进行检查，不符合要求处，应及时补救，直至达到设计要求。

采用重型击实试验方法确定标准最大干密度；干压实路基可采用浸水环刀法取样测定。采用核子仪检验压实度时应进行标定实验，确认其可靠性<sup>[2]</sup>。

## 3 结论

沙漠公路因其特殊性，在实际设计及施工中，因全面综合地进行考虑处理，不仅进行合理性对比，更要进行经济性比较。

沙漠公路设计前应做好调查研究，收集沿线地质结构，水文条件，气象气候。特别是重点调查风向风速、筑路材料等。其次，沙漠公路的设计应是一个全专业，多方面的综合性工作。较其他项目，更要注重总体、路线、路基的沟通协调设计。最后，防沙设计不仅要考虑目前防沙工程的措施及费用，更要考虑后期防沙工程的维护费用，经研究，后期维护费用占到防沙工程建设费用的 30%~50%，因此防沙措施要考虑材料费用，施工简易程度，材料来源等。

沙漠公路应注重资料收集，选择降低防沙工程建设、维护费用及施工难度的措施。施工时应注重压实度等工程质量，提高技术要求，减小劳动强度，保护生态环境<sup>[3]</sup>。

### 参考文献

- [1] 李志农,陈晓光,谢海巍. 沙漠地区公路建设成套技术研究[R].北京:新疆交通科学研究院,2008.
- [2] 陈晓光,谢海巍. 沙漠地区公路建设成套技术论文集[C].北京:新疆交通科学研究院,2006.
- [3] 潘多国,张福玲. 沙漠地区公路路基防护设计与施工[J].内蒙古公路与运输,2001,21(1):56-58.

# Low-cycle fatigue performance test of steel structure beam-column joints

Jinfeng Sun

Shanxi Zhongfang Sente Architectural Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030002, China

## Abstract

Under cyclic loading, the beam-column joints of steel structures are prone to low-cycle fatigue failure, which directly affects structural safety. To clarify the fatigue performance of such joints, experimental work should be carried out to analyze the stress changes, strain laws, crack generation and development, load-bearing levels and energy consumption of different structural joints, through multi-parameter monitoring and comparative analysis. The self-structure of the node and the magnitude of the load it bears have a significant impact on fatigue performance. Optimization measures in the structure can delay the occurrence and development of damage. Such research results can provide references for the formulation of anti-fatigue design schemes for nodes and the enhancement of the overall seismic toughness of steel structures.

## Keywords

Steel structure beam column nodes; Low cycle fatigue; Fatigue test; fatigue performance

## 钢结构梁柱节点低周疲劳性能试验

孙晋峰

山西中方森特建筑工程设计研究院有限公司, 中国·山西太原 030002

## 摘要

钢结构梁柱节点循环荷载作用下易低周疲劳破坏, 直接关系到结构安全, 明确这类节点疲劳性能, 开展试验工作, 分析不同构造节点应力变化、应变规律、裂纹产生发展、承载水平及耗能情况, 借助多参数监测与对比分析。节点自身构造、所受荷载大小等因素对疲劳性能影响明显, 构造上的优化措施能够延缓损伤出现与发展, 这样的研究成果可为节点抗疲劳设计方案制定、钢结构整体抗震韧性增强提供参考。

## 关键词

钢结构梁柱节点; 低周疲劳; 疲劳试验; 疲劳性能

## 1 引言

钢结构梁柱节点是力流传递关键枢纽, 低周疲劳性能直接关乎建筑结构抗震安全。地震等往复荷载作用, 节点易因累积损伤引发突发性破坏, 历史震害多次印证这类风险。韧性城市建设理念推进, 对节点循环荷载下力学行为要求更高。现有研究对节点疲劳演化细节揭示不足, 需系统试验探究内在规律, 优化节点构造、完善抗疲劳设计方法可获支撑。

## 2 试验设计方案

### 2.1 试件参数选取

采用栓焊混合节点与全焊接节点两种典型构造, 模拟工程中常见形式, 梁柱截面尺寸按 1:2 缩尺比例设计, 各项力学性能需保持相似, 材料确定为 Q355B 钢材, 通过材性

试验得到屈服强度、抗拉强度及伸长率等基础参数(见表 1)。节点域加劲肋厚度、螺栓直径等关键参数设置 3 组变量(见表 2), 以此探究构造细节对低周疲劳性能产生的影响, 试验效率与参数覆盖度都要兼顾。

### 2.2 加载制度制定

参照现行抗震规范, 设定屈服位移为基准值, 按  $0.5\Delta_y$ 、 $1\Delta_y$ 、 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$  分级加载, 每级循环 8 次。加载波形选用三角波, 加载速率控制在  $0.5\text{mm/s}$ , 平衡加载效率与试件响应稳定性。当节点承载力出现明显下降并达到疲劳失效临界状态时终止试验, 既符合疲劳失效判定标准, 又能完整捕捉裂纹扩展至破坏的全过程, 为低周疲劳寿命评估提供完整数据链。

表 1 Q355B 钢材材性试验结果

力学性能指标	测试值	标准差	规范标准值
屈服强度 (MPa)	368	12.5	$\geq 355$
抗拉强度 (MPa)	520	18.3	$\geq 490$
伸长率 (%)	24	1.8	$\geq 21$
弹性模量 (GPa)	206	5.2	206

【作者简介】孙晋峰 (1973-), 男, 中国山西吕梁人, 硕士, 高级工程师, 从事结构工程研究。

表 2 试件构造参数分组

试件类型	加劲肋厚度 (mm)	螺栓直径 (mm)	节点域厚度 (mm)	焊接工艺
全焊接节点 - 1	10		12	坡口焊 (余高 5mm)
全焊接节点 - 2	12		14	熔透焊 (余高 3mm)
栓焊混合节点 - 1	10	20	12	角焊缝
栓焊混合节点 - 2	12	22	14	角焊缝
栓焊混合节点 - 3	14	24	16	角焊缝

### 2.3 测量指标确定

力学指标包含节点荷载 - 位移滞回曲线、屈服荷载、峰值荷载及刚度退化系数, 力传感器与位移计实时采集数据, 损伤特征指标紧盯裂纹萌生具体位置、扩展快慢及长度变化, 高精度应变片阵列监测应力集中区域情况, 数字图像相关技术记录表面裂纹演化过程<sup>[1]</sup>。节点域应变分布同步监测, 塑性发展规律详细分析, 多维度指标体系由此形成, 全面反映低周疲劳过程中的力学行为表现与损伤累积具体特性。

### 2.4 试验设备选用

试验设备用 5000kN 电液伺服压力试验机, 能满足大吨位往复加载需求, 加载装置有双向作动器, 水平与竖向荷载协同作用可实现, 节点实际受力状态得以模拟, 测量系统含 16 通道动态数据采集仪, 采样频率定为 100Hz, 瞬时应力变化能确保捕捉。裂纹监测将超声探伤仪与光学显微镜组合, 前者可探测内部隐性裂纹, 后者能观测表面微观裂纹, 设备选型考虑精度与量程, 智慧建造对试验数据数字化、高精度的要求能符合, 后续数据分析可获可靠硬件支撑。

## 3 疲劳性能分析

### 3.1 应力应变特征

弹性阶段, 节点域应力分布均匀, 应变随荷载呈线性变化, 梁翼缘与柱连接部位应变稍高于其他区域, 数值未超出材料屈服极限, 进入塑性阶段, 应力集中现象明显起来, 焊缝端部及螺栓孔边缘出现应变峰值, 应变增长速率快于荷载增幅, 形成明显的塑性滞回环。相同荷载作用下, 全焊接节点的应变集中系数大于栓焊节点, 这源于焊缝金属与母材力学性能存在差异, 造成应力传递过程不连续。

### 3.2 裂纹演化规律

初始阶段, 焊缝咬边或母材夹杂处会形成微米级微裂纹, 长度大多小于 0.1mm, 只有扫描电镜能观测到沿晶界出现的断续开裂, 循环次数不断增加, 微裂纹逐步贯通形成宏观裂纹, 扩展方向受最大切应力控制, 节点域呈现出 45 度倾斜扩展特征。相同条件下, 全焊接节点裂纹扩展速率比栓焊节点快, 因为焊接残余应力会加速裂纹尖端塑性区发展, 红外热像仪监测时发现, 裂纹扩展区存在局部温度升高现象, 温度梯度变化和裂纹扩展速率呈正相关, 引入分形几何理论分析裂纹路径, 其分形维数随损伤加剧从 1.0 增加到 1.2, 能够量化表征裂纹形态的复杂程度, 为损伤程度评估提供了新的量化指标。见表 3。

### 3.3 承载力衰减趋势

初始循环阶段, 节点承载力稳定, 衰减幅度微小, 材

料循环硬化抵消部分损伤。宏观裂纹出现, 承载力进入加速衰减期, 每次循环损失量随裂纹长度增加而增大, 全焊接节点衰减速率快于栓焊节点, 临近破坏, 承载力陡降, 裂纹已贯穿节点关键传力部位, 剩余截面难以承受荷载<sup>[2]</sup>。荷载 - 位移曲线特征点分析, 屈服荷载衰减先于极限承载力, 可作早期损伤预警指标, 不同构造节点承载力储备差异显著, 增设加劲肋的节点相同循环次数下保留率高于普通节点, 构造优化对延缓衰减有积极作用。

表 3 宏观裂纹扩展速率 (2Δy 加载级, 单位: mm / 循环)

循环次数区间	全焊接节点 - 1	全焊接节点 - 2	栓焊混合节点 - 2
100-200	0.021	0.015	0.008
200-300	0.035	0.022	0.012
300-400	0.052	0.031	0.018

### 3.4 耗能能力变化

弹性阶段耗能来自材料弹性变形, 滞回环面积小、形状扁窄, 耗能能力稳定在较低水平, 进入塑性阶段, 材料塑性变形成为耗能主体, 滞回环面积显著扩大, 屈服位移附近达到峰值, 节点域形成稳定塑性铰, 裂纹开始扩展, 耗能能力逐渐下降, 滞回环出现“捏缩”, 环向面积缩减速率随裂纹长度增加而加快。栓焊节点后期耗能保持能力优于全焊接节点, 螺栓滑移可分担部分能量耗散, 能延缓滞回环退化过程, 不同阶段耗能特征差异明显, 反映节点从弹性到破坏的能量耗散变化规律。

## 4 影响因素探究

### 4.1 节点构造影响

全焊接节点采用坡口焊连接, 焊缝余高与过渡圆角尺寸直接改变应力流分布, 余高过大会形成尖锐拐角, 导致应力集中系数不断攀升; 采用熔透焊工艺能减少焊缝内部气孔这类缺陷, 让裂纹萌生寿命得到延长, 栓焊混合节点中, 高强度螺栓的预紧力控制着滑移面摩擦传力的比例, 预紧力不足会引发接触面出现相对滑移, 产生的附加剪切应力会加速疲劳损伤。节点域厚度与梁柱翼缘的匹配关系同样关键, 当节点域厚度小于梁翼缘厚度 1.2 倍时, 容易出现塑性变形集中的情况, 而增设斜向加劲肋可将应力分散角度从 45 度扩大至 60 度, 使应力集中程度显著降低, 新型装配式节点通过榫卯式连接减少现场焊接的工作量, 其疲劳性能比传统节点提升明显, 体现出模块化建造理念对结构耐久性的优化作用。

### 4.2 荷载幅值影响

弹性阶段荷载幅值作用, 节点应力循环在材料比例极