

文章编号:1673-2049(2017)05-0001-20

焊接管节点疲劳研究综述

刘永健,姜磊,王康宁

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为加深对焊接管节点疲劳问题的认识,对焊接管节点名义应力法、热点应力法、切口应力法和断裂力学法4种常用疲劳评估方法应用现状和存在问题进行介绍,从疲劳效应(热点应力集中系数)和抗力(热点应力幅 $S-N$ 曲线)2个方面对首推的热点应力法研究现状进行总结,探讨了管节点结构形式的发展趋势。结果表明:焊接管节点常用四大疲劳评估方法中名义应力法应用最广,但过于保守,热点应力法最被推崇,但仍有待进一步完善,切口应力法实施难度大,尚未在规范中使用,断裂力学法则适用于剩余疲劳寿命评估;对于传统的圆形和矩形钢管节点,已形成了较为系统的热点应力评估方法,对热点应力集中系数最大值可能发生位置、外推区域、热点应力集中系数计算公式、壁厚效应修正系数等方面进行了明确的规定;在传统的圆钢管和矩形钢管节点基础上,创新节点形式,提出了钢管混凝土节点、PBL加劲型钢管混凝土节点、圆管-方管节点和鸟嘴式节点,对比传统钢管节点,钢管混凝土节点热点应力集中系数降幅在25%以上,PBL加劲型矩形钢管混凝土节点降幅在50%以上,圆管-方管节点和鸟嘴式节点降幅则介于圆形钢管和矩形钢管节点之间。

关键词:桥梁工程;焊接管节点;疲劳性能;评估方法;热点应力集中系数;新型节点;综述

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Review of Fatigue Behavior in Welded Tubular Joints

LIU Yong-jian, JIANG Lei, WANG Kang-ning

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to deepen the understanding of fatigue problem of welded tubular joints, the application status and existing problems of four frequently used assessment approaches including nominal stress approach, hot spot stress approach, notch stress approach and fracture mechanics approach were introduced. The current research of hot spot stress approach, which was the most suggested, was summarized in the aspects of fatigue effect and fatigue resistance. The structural development trend of tubular joints was explored. The results show that in the four frequently used approaches, the nominal stress approach is the most widely used, but it is over-conservative. The hot spot stress approach is the most suggested and it needs to be perfected. The notch stress approach will be applicable in an assessment of residual fatigue life. The comparatively systematic hot spot stress approach is proposed for traditional circular and rectangular tubular joints, and possible position of maximum hot spot stress, extrapolation region, equations for hot spot stress concentration factor, thickness correction factors are specified. Based on the traditional circular and rectangular tubular joints, the structure of joints is

收稿日期:2017-08-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51378068);国家重点研发计划资助(2016YFC0701202);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821175015)

作者简介:刘永健(1966-),男,江西玉山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lyj_chd@gmail.com。

innovated, and the concrete filled steel tube joints, concrete filled steel tube joints stiffened with PBL, circular hollow section-rectangular hollow section (CHS-RHS) joints, bird-beak square hollow section (SHS) joints are proposed. Comparing with traditional joints, the hot spot stress concentration factor of concrete filled steel tube joints and concrete filled steel tube joints stiffened with PBL reduce more than 25% and 50% respectively. The hot spot stress concentration factor of bird-beak SHS joints is between circular tubular joints and rectangular tubular joints.

Key words: bridge engineering; welded tubular joint; fatigue behavior; assessment method; hot spot stress concentration factor; new-type joint; review

0 引言

钢管结构作为闭口截面,以其绕流性能好、防腐特性优异、自重轻、造型美观和施工便捷等优点,在海洋平台、高层建筑、输电塔架等结构中已得到了广泛的应用。近 20 余年来,在桥梁工程领域应用也越来越广,为满足更高的受力要求,钢管内填混凝土形成钢管混凝土结构,已经成为大跨度拱桥的首选拱肋结构,同时,其作为桁梁桥主桁结构、格构式桥墩、桥塔等同样具有较强的竞争力^[1-4]。

在桁式拱桥拱肋、桁梁桥主桁和格构式桥墩中,支管、主管连接常采用直接相贯焊接的节点构造,由于焊接部位应力集中程度高以及焊接初始缺陷的影响,在反复荷载下节点易发生疲劳开裂,再加上桥梁结构服役时间长,在服役期限内,环境复杂,荷载不确定,疲劳荷载作用下节点不断劣化,从而影响桥梁结构的服役安全性和耐久性。此外,桥梁承受车辆循环荷载作用,其应力幅值较高,相比建筑结构疲劳问题更为突出。近几年,在中国已建成的钢管结构桥梁中,焊接管节点疲劳问题已逐渐凸显^[5]。1998 年福建省建成的一座中承式钢管混凝土拱桥,在 2013 年定期检测中发现节点疲劳开裂^[6]。中国自 1990 年第 1 座钢管混凝土拱桥四川旺苍大桥建成以来,近 20 多年已取得了举世瞩目的成果,世界已建和在建的大跨(跨径不小于 50 m)钢管混凝土拱桥 500 余座,其中,中国正在运营和在建的大跨钢管混凝土拱桥 400 余座^[7-9]。同时,钢管混凝土结构作为桁架主梁应用也越来越广,如湖北秭归县向家坝大桥、广东南海市紫洞大桥、重庆万州大桥、四川干海子特大桥、黄延高速 K15+644.312 桥等^[10-11]。因此,随着桥梁服役时间的增长,焊接管节点疲劳问题将呈现普遍性和多发性的特征,会造成重大的社会经济损失。

管节点是钢管结构桥梁的关键,焊接管节点疲

劳问题一直是各国学者研究的热点问题^[12]。钢管结构早期主要应用于海洋结构,海洋平台中的钢管桁架长期承受海浪和风等交变荷载作用,历史上曾发生多起因节点疲劳失效导致的海洋平台事故,因此,焊接管节点疲劳问题很早就引起了学者的关注,但由于海洋平台桁架钢管多采用圆形截面,其研究成果多集中于圆形钢管。20 世纪 90 年代开始,钢管桁架结构在桥梁工程中得到应用,其钢管截面可采用圆形和矩形截面,国际管结构协会(CIDECT)设立多项重大研究项目,重点对矩形钢管焊接节点疲劳性能进行研究,项目主要由荷兰代尔夫特理工大学和德国卡尔斯鲁厄理工学院承担,并形成管结构设计规范^[13-15]。国际焊接协会(IIW)则成立联合工作组(XII-XV),对各国研究成果进行总结,于 1996 年颁布该协会第 1 版焊接结构规范,给出焊接管节点疲劳评估方法^[16]。此外,中国交通运输部、欧洲钢结构协会(ECCS)、美国焊接协会(AWS)、美国石油协会(API)、挪威船级社(DNV)、日本建筑协会(AIJ)和日本土木协会(JSCE)等也开展了系列研究,形成了相应的焊接管节点疲劳规范^[17-21]。目前,国外各规范对于管节点疲劳评估仍以偏于保守的名义应力法为主,对于国际首推的热点应力法,虽然已纳入国外规范,但仍需深入研究和完善,对于更为准确的切口应力法和断裂力学法,由于使用复杂,研究难度大,尚未达到规范应用。相比国外规范,中国规范则仅给出了名义应力法,严重阻碍了管结构在桥梁中的应用。同时,为进一步提高节点抗疲劳性能,在传统的圆形和矩形钢管节点基础上,钢管混凝土节点、PBL 加劲型钢管混凝土节点、圆管-方管式节点和鸟嘴式钢管节点等新型节点相继被提出,其疲劳损伤机理和疲劳评估方法仍需进一步研究。

因此,在中国大力推动钢桥和组合结构桥梁建设的大背景下,本文将对钢管节点的名义应力法、热点应力法、切口应力法和断裂力学法四大常用疲劳

评估方法进行介绍,并对国内外推荐的热点应力法和新型节点研究现状进行总结,理清当前研究的主要问题和将来的研究方向,以期推动钢管结构在桥梁中的应用。

1 焊接管节点疲劳性能评估方法

1.1 焊接管节点疲劳性能评估方法分类

焊接管节点疲劳开裂常发生于支管、主管连接部位,由于节点几何尺寸、焊缝尺寸、焊接残余应力和焊接缺陷等因素影响,连接部位局部应力分布复杂,在试验分析和数值计算时难以得到准确的应力水平,允许结果具有一定的离散性。疲劳评估方法则是在平衡了问题的复杂性和结果的精确性基础上提出的,其精确程度越高,对应的分析方法则越复杂。对此,各国学者提出了多种疲劳性能评估方法^[22-33],常用方法主要有 4 种,Radj 等^[31-33]将其分为 2 类:①整体方法,即名义应力法;②局部方法,包括热点应力法(又被称作结构应力法)、切口应力法和断裂力学法。

整体方法指直接根据外荷载(轴力和弯矩),假设截面应力均匀分布,计算得到截面的名义应力幅,以此作为衡量疲劳性能的指标。对于相贯节点支、主管焊接位置,沿钢板厚度方向应力并非均匀分布,其应力分布和组成如图 1 所示,其中, σ_{ns} 为切口应力, σ_m 为膜应力, σ_b 为壳弯曲应力, σ_{nlp} 为切口效应产生的非线性峰值应力。局部方法中的热点应力法则是考虑管节点整体几何尺寸的影响,计算得到焊趾位置的热点应力幅,以此评估疲劳性能,热点应力由膜应力和壳弯曲应力组成,未考虑切口效应的影响。切口应力法则是在热点应力的基础上,考虑焊缝几何尺寸带来的影响,计算得到切口应力和应变来进行疲劳性能评估。3 种方法计算得到的应力水平如图 2 所示,其中, t_0 为主管厚度。

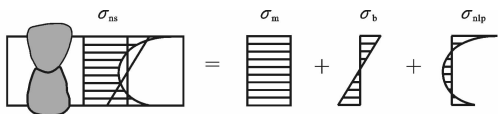


图 1 焊接位置沿钢板厚度方向应力分布和组成
Fig. 1 Stress Distribution and Composition of Welding Position Along Thickness Direction of Steel Plate

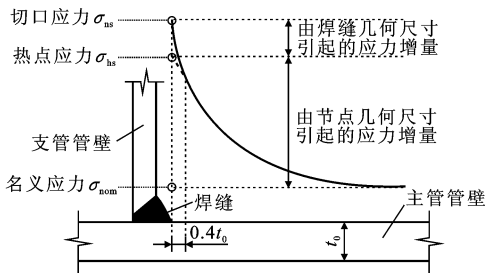


图 2 3 种方法计算得到的应力水平
Fig. 2 Stress Levels Calculated by Three Methods

以上 3 种方法均用于管节点设计阶段疲劳性能评估。断裂力学法则采用线弹性断裂力学理论,假设裂纹已经产生,采用参数 J 积分或应力强度因子幅(ΔK)描绘疲劳裂纹长度(或者裂纹扩展速率 da/dN , a 为裂纹尺寸, N 为荷载循环次数)随荷载循环次数增加的增长,因此,断裂力学法通常用于管节点剩余疲劳寿命的评估。各疲劳性能评估方法如图 3 所示(ΔF 为荷载幅, N 为循环次数, $\Delta\sigma_{nom}$ 为名义应力幅, $\Delta\sigma_{hs}$ 为热点应力幅, $\Delta\sigma_{ns}$ 为切口应力幅, $\Delta\epsilon_{ns}$ 为切口应变幅, $\Delta\sigma$ 为应力幅),从左到右可以看出,各方法考虑的实际条件在逐渐增加,也反映出了各评估方法的精确性和复杂性。本节将简要介绍名义应力法、热点应力法、切口应力法和断裂力学法在焊接管节点疲劳性能评估中的应用现状以及存在的主要问题。

1.2 名义应力法

名义应力法以疲劳荷载作用下的结构名义应力

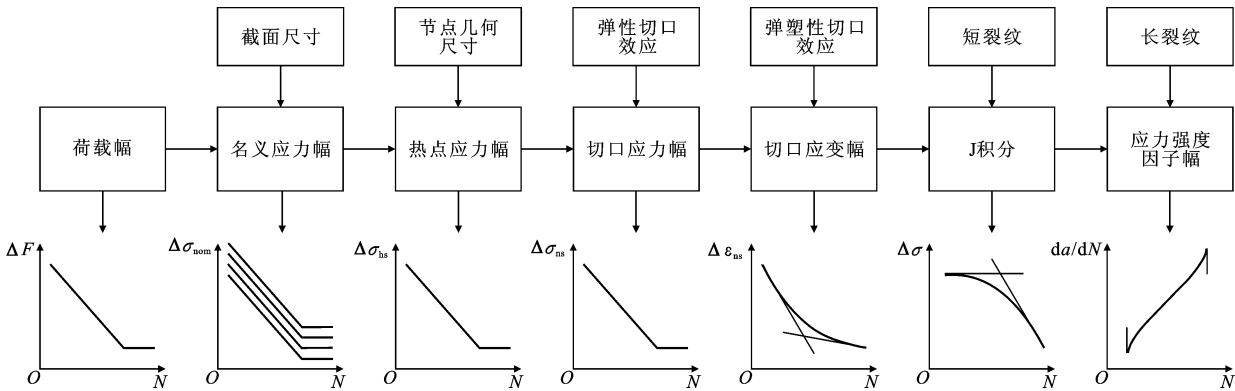


图 3 各疲劳性能评估方法
Fig. 3 Different Assessment Methods for Fatigue Behavior

幅为评价指标,根据对应构造细节的疲劳抗力 $S-N$ 曲线(S 为容许应力幅),得到相应的荷载循环次数,并结合累积损伤准则(通常采用 Miner 线性疲劳累积损伤准则),进行疲劳性能评估。名义应力采用简单梁理论及叠加原理,按下式计算

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W} \quad (1)$$

式中: σ_{nom} 为名义应力; P 为所施加的轴向荷载; A 为截面面积; M 为所施加的弯矩; W 为弯曲截面系数。

根据施加的荷载幅,按式(1)计算,得到名义应力幅 $\Delta\sigma_{\text{nom}i}$ 和相应的循环次数 n_i ,选取合适的等幅容许疲劳抗力 $S-N$ 曲线,得到不同名义应力幅 $\Delta\sigma_{\text{nom}i}$ 对应的容许循环次数 N_i ,根据 Miner 线性累积损伤准则,按式(2)计算累积损伤 D ,以此判定是否发生疲劳破坏,当 $D=1$ 时,则发生疲劳失效。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

名义应力法是所有疲劳评估方法中最简单的方法,难点为等幅容许疲劳抗力 $S-N$ 曲线的确定,需要对大量试验结果进行统计分析得到,但早在 20 世纪 70 年代已基本形成了现在规范中的 $S-N$ 曲线^[34-35]。目前,名义应力法被广泛应用于国内外规范中焊接管节点疲劳评估,中国 2015 年颁布的《公路钢结构桥梁设计规范》则是在参照欧洲 EC3 规范基础上,进行部分修正给出的焊接管节点疲劳评估方法,然而此方法仍存在以下不足:

(1)疲劳强度(名义应力幅 $S_{\text{nom}}-N$ 曲线)取值过于保守。在同类节点形式中(如圆形 K 形钢管节点),节点几何参数不同,其疲劳强度并不相同,而名义应力法将同类不同几何参数节点的疲劳强度进行合并,选取最小 $S_{\text{nom}}-N$ 曲线作为管节点疲劳强度,忽视了整体几何尺寸的影响,大幅低估了部分节点的疲劳强度。

(2)名义应力取值位置的确定。Van Wingerde^[14]指出,在距离端部或支、主管相贯线 $2b \sim 2.5b$ (b 为支管或主管宽度)范围外测得的应力值为名义应力,而各规范中未对名义应力取值位置进行规定,若位置选取不当,疲劳评估结果会产生很大差异。

基于上述分析,国内外学者提出采用局部方法分析管节点疲劳性能,以得到更准确的结果。

1.3 热点应力法

节点相贯线部位刚度分布不均匀,因此,疲劳荷载作用下应力并非均匀分布,应力水平最大点易首

先产生疲劳裂纹。热点应力是指节点几何形状在相贯线焊趾处引起的集中应力,其与名义应力的比值为热点应力集中系数(Hot Spot Stress Concentration Factor, SCF)。热点应力法认为焊接钢管节点疲劳性能与热点应力幅值最大值密切相关,将相贯线焊趾处热点应力幅值最大值作为节点疲劳强度的控制应力幅值。此方法将名义应力、节点的几何尺寸这 2 个因素对焊趾附近局部应力分布的影响进行定量分析,将焊缝尺寸、残余应力等因素的影响用统计的方法在 $S-N$ 曲线中量化考虑,而焊接缺陷则通过焊接质量进行控制。

相比名义应力法,热点应力法具有以下优势^[36]:

(1)相贯节点疲劳裂纹基本发生于焊趾处,此位置应力分布是影响疲劳性能的主要因素,热点应力是焊趾处应力的主要组成部分,焊缝尺寸、残余应力等引起的切口效应产生的非线性峰值应力在 $S-N$ 曲线中考虑,此部分对不同管节点疲劳性能影响大致相同,所以不同形式焊接管节点可以采用相同的热点应力幅 $S_{\text{hs}}-N$ 曲线,不同于名义应力法,需要得到不同形式节点的名义应力幅 $S_{\text{nom}}-N$ 曲线,这一点已经得到大量的疲劳试验证实。如 IIW 规范中给出的热点应力评估方法,对于圆形钢管、矩形钢管的 T, Y, X, K 形节点和空间 XX 形节点,均采用相同的热点应力幅 $S_{\text{hs}}-N$ 曲线。

(2)热点应力法可以反映不同几何参数对节点疲劳性能的影响。在相同名义应力幅值下,节点几何参数不同,对应的 SCF 存在差异,得到的热点应力幅值不同。目前,学者已经给出了各类节点 SCF 计算公式,而对于未给出计算公式和超出几何参数范围的节点,需通过试验或有限元得到。

基于上述优点,热点应力法已成为国际上焊接管节点疲劳评估的主流方法。IIW, EC3, CIDECT, AWS 等规范均已采用此方法,而中国现行规范中,仅《钢管结构技术规程》(CECS 280:2010)^[37]中将热点应力法作为参照依据列入条文说明中。

1.4 切口应力法

切口应力法与名义应力法和热点应力法的评估过程基本类似,首先获得焊趾部位的切口应力幅,然后采用相应的切口应力幅 $S_{\text{ns}}-N$ 曲线,对疲劳易损部位进行评估^[38-41]。由于切口应力为焊趾处的真实应力,通常采用有限元模拟方法获得。有限元计算时,热点应力由于仅考虑节点几何尺寸影响,可通过远离焊趾一定区域内的几个点外推得到,而切口应力需考虑焊趾本身几何尺寸影响,直接取焊趾处应

力值,此应力大于热点应力,如图 2 所示。

相比 SCF,切口应力产生的应力集中程度提高。Van Wingerde^[14]提出可在 SCF 基础上,考虑不同焊接形式的影响,乘以一定的系数得到切口应力集中系数,进而建立切口应力评估方法,但由于以下问题,切口应力法尚未在规范中得到应用:

(1)焊接构造复杂,焊缝形状受焊脚长度、焊脚角度等因素影响,难以准确得到不同焊接构造对应的切口应力集中系数。如果仅规定几种焊接构造,在管结构焊接时则要求严格控制焊接形状,实施难度极大。

(2)焊接构造的改变同样影响热点应力水平。De Back^[42]指出,焊脚长度改变时,对应的节点热点应力幅值也发生改变。

(3)提出统一的切口应力集中系数定义方法仍有待进一步研究。

1.5 断裂力学法

断裂力学法以带裂纹的管节点为研究对象,对裂纹扩展速率进行分析,以此作为疲劳寿命评估依据^[43-46]。Paris 等^[47]指出循环荷载下,裂纹尖端的应力强度因子幅是控制构件裂纹扩展速率的基本参数,建立了表征裂纹扩展速率与裂纹尖端的应力强度因子幅之间的关系,即

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (3)$$

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^n} \quad (4)$$

式中: C, n 均为材料常数; $\Delta K = M_k Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$, M_k 为焊缝形状引起的焊缝放大因子, Y 为裂纹形状修正系数; a_i 为初始裂纹宽度; a_f 为临界裂纹宽度。

根据式(3),在已知初始裂纹宽度 a_i 和临界裂纹宽度 a_f 的情况下,对其积分即可求得构件的疲劳裂纹扩展寿命。采用断裂力学法需要已知管节点的初始裂纹尺寸,由式(3)可知,疲劳寿命仅与材料常数和应力强度因子幅有关,但在实际应用中,由于管节点应力分布复杂,应力强度因子幅往往难以得到。基于有限元模拟的断裂力学法是管节点未来研究的主要方向。

断裂力学法在管节点剩余寿命评估和运营期检修加固等方面已取得了成功应用,该方法对于揭示疲劳裂纹扩展机理及解释管节点疲劳评估中壁厚效应具有重要意义。

2 焊接管节点热点应力法

通过上述分析可知,除热点应力计算精度优于

名义应力外,相比切口应力,热点应力不计局部应力集中,更具有以下优势:从试验角度分析,焊缝质量难以准确控制,因此,焊缝产生的局部应力集中差异较大,且无法将应变片准确贴在焊趾上,难以测量;从有限元计算角度分析,考虑焊缝形状和缺陷影响,即使采用三维有限元模型分析,也难以得到准确的应力值,而热点应力可通过较简单的模型进行分析,且计算结果满足精度要求;从断裂力学角度分析,局部应力仅影响初始裂纹的产生,对裂纹扩展影响较小,而热点应力对占大部分疲劳寿命的裂纹扩展起着控制作用^[48]。因此,热点应力法成为国际上普遍推荐的方法,但此方法同样存在难点:设计者需要根据节点形式、几何参数和荷载类型计算热点应力。对此,学者提出了用于计算热点应力的 SCF 计算公式,需要得到完善的 SCF 计算公式,工作量巨大,这也是近十几年来国内外学者的研究重点^[49]。

2.1 复杂荷载作用下热点应力幅组成

实际工程中,节点位置受到复杂荷载作用,任何复杂荷载均可分解为以下几种基本荷载的组合:①支管轴力;②主管轴力;③支管平面内弯矩;④主管平面内弯矩;⑤支管平面外弯矩。基本荷载形式如图 4 所示。各基本荷载都在节点处产生相应的热点应力幅,将这些热点应力幅线性叠加,可以得到该点的总热点应力幅,即

$$\Delta \sigma_{hs} = S_{ab} \Delta \sigma_{ab} + S_{ac} \Delta \sigma_{ac} + S_{ib} \Delta \sigma_{ib} + S_{ic} \Delta \sigma_{ic} + S_{ob} \Delta \sigma_{ob} \quad (5)$$

式中: $S_{ab}, S_{ac}, S_{ib}, S_{ic}, S_{ob}$ 分别为支管轴力、主管轴力、支管平面内弯矩、主管平面内弯矩、主管平面外弯矩在该点的 SCF; $\Delta \sigma_{ab}, \Delta \sigma_{ac}, \Delta \sigma_{ib}, \Delta \sigma_{ic}, \Delta \sigma_{ob}$ 分别为支管轴力、主管轴力、支管平面内弯矩、主管平面内弯矩、主管平面外弯矩产生的名义应力幅。

2.2 热点应力集中系数

2.2.1 外推法

在荷载作用下,圆形钢管节点 SCF 最大值可能出现在相贯线冠点或鞍点位置的支、主管表面上,如图 5(a)所示。矩形钢管节点的 SCF 最大值则可能出现在相贯线支管角隅部位的支、主管表面上,如图 5(b)所示。因此,在进行试验和有限元模拟时,这些位置均需要进行 SCF 测试和计算。

SCF 需通过外推法得到,即通过焊趾附近某一区域内若干测点的应力外推至焊趾处得到。外推法分为线性外推和二次外推,如图 6 所示(T 为主管或支管厚度)。大量试验研究表明,圆形钢管节点采用线性外推,矩形钢管节点采用二次外推。外推法于

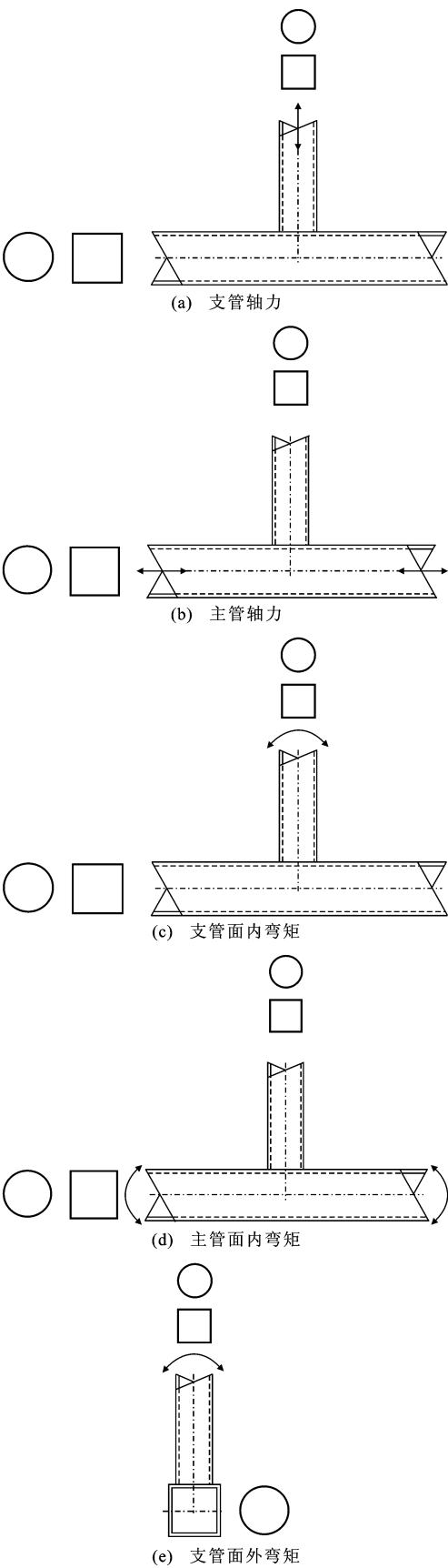


图 4 基本荷载形式
Fig. 4 Basic Types of Loading

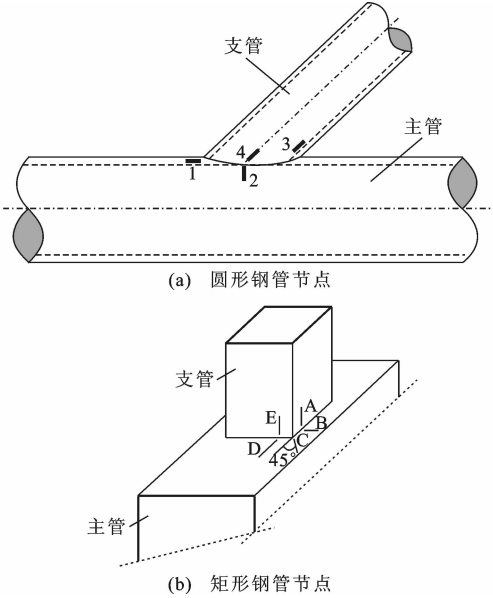


图 5 SCF 最大值可能发生位置
Fig. 5 Possible Positions of Maximum SCF

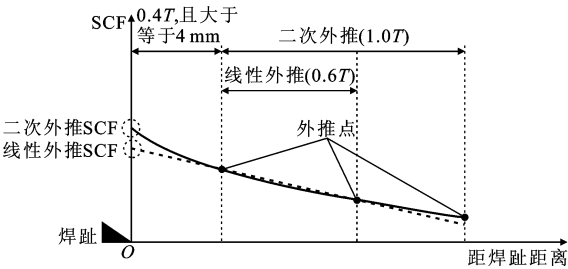


图 6 SCF 外推法
Fig. 6 Method of SCF Extrapolation

1968 年由 Haibach 第 1 次提出，之后各国学者对外推法进行深入研究，并不断完善。美国焊接协会和美国石油协会建议圆形钢管节点取距焊趾 6 mm 至 $0.1\sqrt{r_1 t_1}$ 范围内为外推区域^[19-20]， r_1 、 t_1 分别为支管外半径和厚度。Gurney^[50] 基于对管板角焊缝连接节点的有限元模拟，提出测点距焊趾距离最小应为 $0.4T$ ，随后 Wardenier^[51] 通过研究分析，对 Gurney 的建议表示赞同。国际管结构协会将 Gurney 建议写入 CIDECT 规范，并对外推区域进行完善，明确给出了圆形和矩形钢管节点外推区域规定，见表 1，其中， r_0 为主管外半径。

由图 6 可知，线性外推需要 2 个点，而二次外推需要 3 个点，得到外推点应力值后，对结果进行线性或非线性拟合，进而得到焊趾处热点应力值，其中拟合过程较为繁琐。对此，学者结合有限元模拟方法，提出了外推法简化计算公式，在采用简化计算公式时，需严格按照取值位置划分焊趾区域网格尺寸^[52-53]。当然，在实际有限元计算和试验测量时，由

表 1 CIDECT 规范给出的外推区域规定

Tab. 1 Extrapolation Regions Recommended by CIDECT

距焊趾距离	圆形钢管节点			矩形钢管节点	
	主管		支管	主管	支管
	冠点	鞍点			
外推点距焊趾最小距离 L_{\min}	$0.4t_0$		$0.4t_1$	$0.4t_0$	$0.4t_1$
外推点距焊趾最大距离 L_{\max}	$0.4\sqrt{r_1t_1r_0t_0}$	$0.09r_0$	$0.65\sqrt{r_1t_1}$	$L_{\min}+t_0$	$L_{\min}+t_1$

注:外推点距焊趾最小距离 $L_{\min} \geq 4\text{ mm}$;外推点距焊趾最大距离 $L_{\max} \geq L_{\min} + 0.6t_1$ 。

于节点几何尺寸限制,公式中规定点可能并不存在,因此简化公式法有一定局限性。

国际焊接协会给出了建议的外推方法^[16],此方法对应有有限元模型网格划分较细的情况:

(1)在距焊趾 $0.4T$ 和 $1.0T$ 位置测量应力值 $\sigma_{0.4T}, \sigma_{1.0T}$,进行线性外推,即

$$\sigma_{\text{hs}} = 1.67\sigma_{0.4T} - 0.67\sigma_{1.0T}$$

(6)

(2)在距焊趾 $0.4T, 0.9T$ 和 $1.4T$ 位置测量应力值 $\sigma_{0.4T}, \sigma_{0.9T}, \sigma_{1.4T}$,进行二次外推,即

$$\sigma_{\text{hs}} = 2.52\sigma_{0.4T} - 2.24\sigma_{0.9T} + 0.72\sigma_{1.4T}$$

(7)

Fricke^[54]提出建议的外推方法,此方法对应有有限元模型网格划分较粗的情况:

(1)在距焊趾 $0.5T$ 和 $1.5T$ 位置测量应力值 $\sigma_{0.5T}, \sigma_{1.5T}$,进行线性外推,即

$$\sigma_{\text{hs}} = 1.5\sigma_{0.5T} - 0.5\sigma_{1.5T}$$

(8)

(2)在距焊趾 $0.5T, 1.5T$ 和 $2.5T$ 位置测量应力值 $\sigma_{0.5T}, \sigma_{1.5T}, \sigma_{2.5T}$,进行二次外推,即

$$\sigma_{\text{hs}} = 1.875\sigma_{0.5T} - 1.25\sigma_{1.5T} + 0.375\sigma_{2.5T}$$

(9)

2.2.2 试验测量

SCF 反映的是荷载作用下焊趾处的应力集中程度,并不需要进行疲劳试验,仅通过静力试验即可获得。SCF 与外荷载形式、节点几何尺寸和节点边界条件有关,而与节点的外荷载大小无关,此外,有学者提出焊脚尺寸对其也有影响^[14,55-56]。节点几何尺寸对 SCF 的影响通过节点的量纲一的几何参数,即支主管宽度比 β 、主管宽厚比 2γ 、支主管厚度比 τ 和支主管夹角 θ 反映,也就是说,某一节点按一定比例放大或缩小,其 SCF 相同。

影响管节点 SCF 的几种基本荷载形式如图 4 所示。结合工程中节点实际应用情况,钢管节点可以分为 T、Y、X 和 K 形几种形式。学者们为得到管节点 SCF 计算公式,通常采用试验和有限元结合的方法进行研究,由于试验成本较高,学者仅开展少量 SCF 测试试验,之后结合试验结果建立有限元模型,进行大量参数分析。对 T、Y 和 X 形节点,试验中通常仅施加图 4 中的单一荷载进行系列研究,而

对于 K 形节点,存在受拉支管和受压支管,仅施加图 4 单一荷载并不符合实际受力,因此试验中需施加支主管平衡荷载,图 7 给出了文献[57],[58]中 K 形节点试验荷载 P 和边界条件。同时,还可以开展桁架节段试验或实桥试验,测试节点 SCF^[59]。

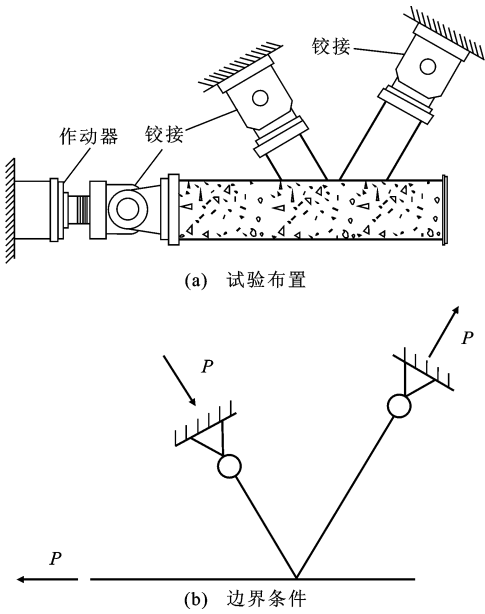


图 7 文献[57],[58]中 K 形节点试验荷载和边界条件

Fig. 7 Test Loads and Boundary Conditions of K-joint in Literature [57],[58]

文献[14],[36]指出,在进行支管轴力 SCF 试验时,对于 X 形节点,可以固定一根支管端部,在另一根支管端部施加轴力,而对于 T 形节点,在支管端部施加轴力时,应注意主管端部的边界条件,若为铰接,则可认为仅受支管轴力,如图 4(a)的荷载形式,若为固接,则在主管端部将产生附加面内弯矩,在分析 SCF 时,应视为图 4(a)和图 4(e)两种基本荷载形式的组合。现行圆形钢管和矩形钢管节点 SCF 计算公式中,对支管轴力作用下主管附加弯矩的考虑方式不同。对于圆形钢管节点,Efthymiou 等^[60]引入反映主管长度的参数 α 和主管约束条件的参数 C ,其中 $\alpha = 2l_0/d_0$, l_0 为主管长度, d_0 为主管直径, C 的取值与主管边界条件有关,当主管两端固

接时 $C=0.5$, 当两端铰接时 $C=1.0$, 两端约束介于固接和铰接之间时, 取 $C=0.7$, 以此给出支管轴力和主管弯矩引起的 SCF 计算方法。对于矩形钢管节点, Van Wingerde^[14] 则是分别计算 2 种荷载形式引起的热点应力集中系数 S_{SCF} , 按力学进行线性叠加, 即

$$\begin{aligned} S_{SCF} &= S_{ab} + S_{ic} \frac{A_1(l_0 - h_1)}{4W_0} \quad \text{或} \\ S_{SCF} &= S_{ab} - S_{ic} \frac{A_1(l_0 - h_1)}{4W_0} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: A_1 为支管截面面积; h_1 为支管截面高度; W_0 为主管弯曲截面系数。

在早前研究中, 学者们分别提出了采用主应力或垂直焊趾方向的应力值来确定 SCF, 之后 Van Wingerde 等^[61] 建议采用垂直焊趾方向的应力, 而不采用主应力, 理由是: ① 试验中, 垂直方向的应力更容易测量, 而主应力需要布置应变花, 由于外推区域比较狭窄, 往往难以布置足够的应变花; ② 选用垂直方向应力对其应力方向规定明确, 而不同荷载下主应力方向并不相同; ③ 在临近焊趾处, 垂直焊趾方向应力和主应力差值较小, 同时在不同荷载工况下, 单向应力的数值可以叠加, 而主应力不能直接叠加。试验中需要严格按表 1 在外推区域密布应变片得到应变值, 通过外推法可以得到热点应变集中系数 S_{SNCF} , 即

$$S_{SNCF} = \varepsilon_{\perp} / \varepsilon_n \quad (11)$$

式中: ε_{\perp} 为垂直焊趾应变; ε_n 为名义应变。

Shao^[62] 基于胡克定律, 给出 S_{SCF} 和 S_{SNCF} 的关系式

$$S_{SCF} = [(1 + \nu \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}) / (1 - \nu^2)] S_{SNCF} \quad (12)$$

式中: ε_{\parallel} 为平行焊趾应变; ν 为泊松比。

式(12)中 S_{SCF} 和 S_{SNCF} 比值在 0.6~1.4 之间。CIDECT 规范基于 Frater^[63] 和 Van Delft 等^[64] 的研究成果, 建议圆形钢管节点比值取 1.2, 矩形钢管节点比值取 1.1。Feng 等^[65] 建议不锈钢 X 形管节点比值取 1.08。Cheng 等^[66] 建议方形鸟嘴式 T 形节点比值取 1.15。

Van Wingerde^[14] 通过试验研究发现, 试验中外推法测得的 SCF 可能偏低, 因此建议 SCF 不能小于 2。

2.2.3 有限元模拟

要给出节点 SCF 计算公式, 需要得到不同 β , 2γ , τ 和 θ 等量纲一的几何参数下节点的 SCF。节

点 SCF 可通过试验和有限元模拟方法获得, 试验方法直接可靠, 但成本较高, 无法大量进行试验; 随着有限元方法的发展和一些成熟通用软件的大量使用, 基于少量试验并结合大量有限元参数模拟的研究方法得到国内外学者的广泛认可。

在试验分析时, 仅能通过支、主管表面应变片测得的应变值进行外推, 得到焊趾处的 SCF, 而采用有限元模拟时, 具有 3 种分析 SCF 的方法: ① 钢管表面外推法, 如图 8(a) 所示; ② 沿焊趾处钢管厚度外推法, 如图 8(b) 所示; ③ 沿距焊趾一定距离处钢管厚度外推法, 又称作 Dong 法, 如图 8(c) 所示。方法③由 Dong^[27] 提出, 之后 Poutiainen 等^[67] 进行了优化, 此方法与早期 Tovo 等^[68] 采用的方法类似。Dong 法在综合方法①, ②的基础上, 根据力的平衡关系进行计算。热点应力由膜应力和壳弯曲应力组成, 采用有限元模拟, 分别得到距离焊趾处钢管厚度方向垂直焊趾应力 σ_x 和剪应力 τ_{xy} , 按以下力的平衡关系计算, 即

$$\sigma_m = \frac{1}{T} \int_0^T \sigma_x(y) dy \quad (13)$$

$$\sigma_m \frac{T^2}{2} + \sigma_b \frac{T^2}{6} = \int_0^T \sigma_x(y) y dy + \delta \int_0^T \tau_{xy}(y) dy \quad (14)$$

在三维有限元模拟方法中, 单元类型的选择是学者最关心的问题, 同时积分方案、网格尺寸、焊缝尺寸和钢管边缘倒角对 SCF 计算精度也有影响。国内外学者针对有限元模拟方法进行了系列研究, 并给出了不同的建议。IIW 和 DNV 规范针对壳单元和实体单元有限元模拟方法给出了详细的规定, 指出采用厚壳单元模拟适用于焊缝影响较小且计算精度要求较低的 SCF 计算; 若焊缝尺寸对 SCF 影响较大, 可采用以下方法进行处理: ① 采用倾斜壳单元模拟焊缝, 如图 9(a) 所示; ② 在焊缝部位对壳单元截面加厚, 如图 9(b) 所示。程高等^[69-71] 采用壳单元模拟钢管节点 SCF, 其中文献[69], [71] 提出单独建立厚壳单元模拟焊缝。

与壳单元相比, 采用实体单元计算得到的 SCF 更准确。Romeijn^[72] 以圆管空间节点为例, 建立不同模型进行有限元方法研究: ① 4 节点壳单元模型, 不模拟焊缝; ② 8 节点壳单元模型, 不模拟焊缝; ③ 8 节点壳单元模型, 不模拟焊缝, 不同于模型②, 其焊趾位置取几何实际位置, 而不是模型中支、主管交叉点; ④ 8 节点实体单元, 模拟焊缝; ⑤ 20 节点实体单元, 模拟焊缝。通过对不同模型计算得到的 SCF 与实测节点 SCF 对比, 建议: 选用 20 节点实体单元模

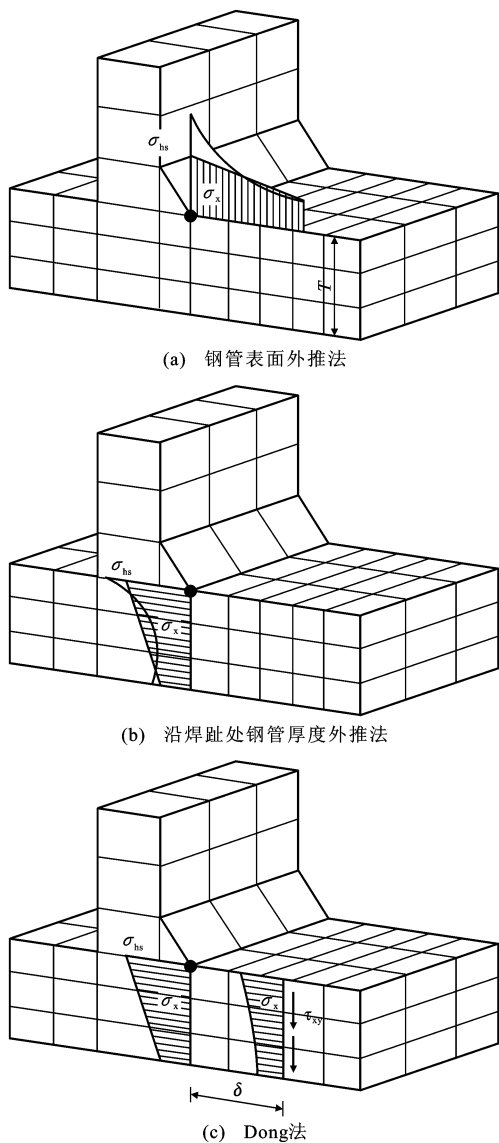


图 8 基于有限元模拟的 SCF 分析方法
Fig. 8 Analysis Methods of SCF Based on
Finite Element Modelling

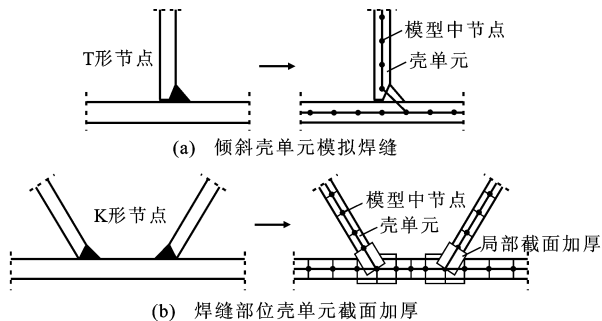


图 9 壳单元模拟中焊缝处理方法

Fig. 9 Weld Treatment Method in Shell Element Simulation
拟,且应模拟焊缝;2×2×2 积分优于 3×3×3 积分;外推区域网格尺寸应小于整个积分区域长度的 1/16。20 世纪由于计算机的计算能力限制,采用实

体单元计算成本较高,但考虑到实体单元计算的精确性, Van Wingerde^[14] 和 Herion^[73] 提出焊缝几何尺寸对 SCF 影响较大,建议在支、主管相贯区域采用实体单元,而在不关心区域采用壳单元,实体单元和壳单元通过 13 节点的过渡单元连接,同时应充分考虑钢管边缘倒角尺寸。Pey 等^[74] 则指出壳单元虽然可以准确模拟支管和主管的应力分布,但由于无法准确模拟焊缝,支、主管相贯部位的应力模拟误差较大,提出类似 Herion 的模拟方法,但取消了过渡单元,而是基于实体单元和壳单元位移和转角的协调性直接连接。进入 21 世纪,随着计算能力的发展,实体单元成为学者们推荐的单元类型。Shao 等^[75-77] 指出在模拟圆形钢管节点时,不模拟焊缝得到的 SCF 值偏大,以此得到的疲劳评估方法偏保守,因此建议采用实体单元,同时应对焊缝的几何尺寸进行准确模拟。Feng 等^[65,78] 建议采用六面体减缩积分实体单元模拟矩形钢管节点,并给出了网格尺寸划分建议。Tong 等^[79] 对圆管-方管节点进行 SCF 有限元模拟,建议采用 10 节点四面体实体单元。Cheng 等^[66] 对方形鸟嘴式 T 形节点模拟时建议采用 20 节点实体单元。

2.2.4 SCF 计算公式

圆形钢管应用早于矩形钢管,因此针对圆形钢管节点 SCF 的研究起步较早,20 世纪 60 年代, Beale 提出了最早的圆形钢管节点 SCF 计算公式,但此公式不能很好地预测节点的 SCF。之后学者们对圆形和矩形钢管节点开展了大量的试验和有限元研究,并形成了不同的 SCF 计算公式,见表 2。SCF 计算公式可以表示为含有不同量纲一的几何参数的函数表达式,即

$$S_{SCF} = f(\alpha, \beta, 2\gamma, \tau, \theta, \zeta, \epsilon) \quad (15)$$

式中: ζ 为 K 形节点相对间距,为 g/d_0 或 g/b_0 , g 为 K 形节点两支管间距; ϵ 为节点偏心率,为 e/d_0 或 e/b_0 , e 为节点偏心距。

Kuang 等^[80] 采用厚壳单元对圆形钢管 T/Y, K 和 KT 形节点 SCF 进行模拟,给出了轴力、面内弯矩和面外弯矩不同荷载形式下节点的 SCF 计算公式,但对于 $\beta > 0.8$ 的节点并不适用,之后 Kuang 等^[81] 对提出的公式进行了完善和修正。文献^[82] 完成了圆形钢管 T/Y, K, X 和 KT 形节点系列试验研究,给出了轴力、面内弯矩和面外弯矩不同荷载形式下节点的 SCF 计算公式,被早期 IIW 规范所采用。现在普遍采用的圆形钢管 T/Y 和 X 形节点 SCF 计算方法由 Zhao 等^[15,60] 基于有限元分析提

表 2 SCF 计算公式统计

Tab. 2 Statistics of Calculation Equations for SCF

数据来源	节点类型	钢管截面形式	公式获得方法	时间
文献[80],[81]	T/Y,K,KT 形节点	圆形	有限元	1975 年,1977 年
文献[82]	T/Y,K,X,KT 形节点	圆形	试验	1978 年,1981 年
文献[15],[60]	T/Y,X,K 形节点	圆形	有限元	1985 年,1988 年
文献[72]	T/Y,X,K,TT,XX,KK 形节点	圆形	有限元	1994 年
文献[83]	空间节点	圆形、矩形	有限元	1996 年
文献[84],[85]	K 形节点、空间节点	圆形	有限元	1997 年,2000 年
文献[86],[87]	T/Y 形节点	圆形	有限元	1990 年
文献[88],[89]	T/Y,X 形节点	圆形	有限元	1996 年,1999 年
文献[90],[92]	K,KT 形节点	圆形	试验、有限元	1997 年,1998 年
文献[93],[94]	T/Y,X,K,KK 形节点	圆形、矩形	成果总结	1996 年,2001 年
文献[95]	XX 形节点	圆形	有限元	2000 年
文献[96]	K,N 形节点	圆形	试验、有限元	2003 年
文献[76]	K 形节点	圆形	试验、有限元	2009 年
文献[14]	T/Y,X 形节点	矩形	试验、有限元	1992 年
文献[97]	K 形节点	矩形	试验、有限元	1996 年

出,其计算公式被列入CIDECT等规范;圆形钢管 K 形和空间节点 SCF 计算公式则采用 Romeijn 等^[72,83-85]提出的公式。此外,Shao 等^[76,86-96]也给出了相应的圆形钢管节点 SCF 计算公式。

相比圆形钢管节点,矩形钢管节点 SCF 计算公式的相关研究较少。CIDECT 规范给出了完善的计算方法,其中 T/Y 和 X 形节点计算公式采用 Van Wingerde^[14]的研究成果,K 形节点计算公式采用 Van Wingerde 等^[93-94]和 Puthli 等^[97]研究成果,空间节点计算公式则采用 Van Wingerde 等^[94]的研究成果。

2.3 疲劳强度热点应力幅 S_{hs} - N 曲线

2.3.1 疲劳寿命的确定

焊接管节点疲劳破坏分为 3 个阶段:应力集中产生初始疲劳裂纹;裂纹稳定扩展;失稳断裂。学者们定义了 4 个典型循环次数 N 以描述疲劳破坏的全过程: N_1 ,初始裂纹附近的应变下降 15%时的对应循环次数; N_2 ,裂纹萌生时对应的循环次数; N_3 ,裂纹贯穿钢管厚度时对应的循环次数; N_4 ,裂纹长度达到支管一半周长时对应的循环次数。

在以上各循环次数中,研究者常选用 N_3 或 N_4 作为管节点的疲劳寿命(以下简称 N_3 法和 N_4 法)。IIW 规范建议采用 N_3 法评定管节点疲劳寿命,Schumacher 等^[59]和 Chiew 等^[98]均采用此方法。 N_3 法中裂纹贯穿钢管厚度的一瞬间很难被肉眼或摄像仪器捕捉到,因此可采用气压法测定。试验前在主管内预先施加一定的气压,试验过程中通过压力表测主管内压力,当压力发生突变时,可认为钢管

产生贯穿裂纹。Van Wingerde^[14]对圆形钢管 T 形节点试验研究时提出,当 N_4/N_3 的均值约为 1.5 (最大值为 3)时,采用 N_4 和 N_3 得到 S - N 曲线差异很小,对于这种情况,可采用 N_4 作为钢管节点疲劳寿命,Mashiri 等^[99-102]均采用此方法。相比 N_3 法中裂纹贯穿钢管时发生在一瞬间,难以准确测量, N_4 法中裂纹扩展至支管一半周长时可以通过肉眼进行观察,试验中通常布置摄像机对裂纹扩展全过程进行记录。

2.3.2 规范中热点应力幅 S_{hs} - N 曲线

图 10 给出了 AWS,EC3,IIW 和 API 各规范中管节点热点应力幅 S_{hs} - N 曲线。图 10 给出的是基本曲线,对应的钢管壁厚为 16 mm,考虑厚度效应修正后的 S_{hs} - N 曲线在图中未给出。相比 AWS- X_2 和 API- X' 曲线,AWS- X_1 和 API- X 曲线对应的容许应力幅值更大,这是考虑了焊缝形式对节点疲劳的影响,对焊缝磨平等处理后可以采用容许热点应力幅值更大的 S_{hs} - N 曲线。AWS,IIW 和 API 规范曲线仅适用于圆形钢管节点,欧洲规范 EC3 给出了圆形和矩形钢管节点 S_{hs} - N 曲线,EC3-114 适用于圆形钢管节点,EC3-90 适用于矩形钢管节点。各规范中的 S_{hs} - N 曲线虽然不同,但值得注意的是,不同规范中对热点应力的定义和建议的 SCF 公式并不相同,因此应结合 SCF 公式和 S_{hs} - N 曲线进行对比。

2.3.3 考虑壁厚效应的热点应力幅 S_{hs} - N 曲线修正

研究发现,节点的钢管壁厚对其疲劳性能有明

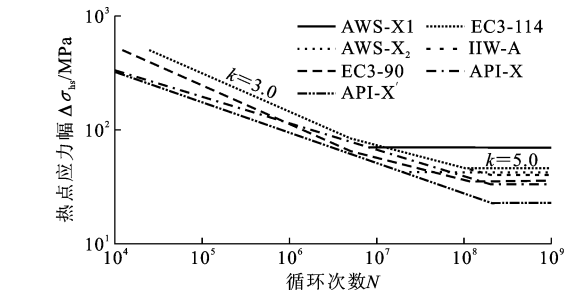


图 10 各规范中热点应力幅 S_{hs} - N 曲线
Fig. 10 Hot Spot Stress Range S_{hs} - N Curves in Different Specifications

显影响,钢管壁厚越薄,对应的疲劳强度越高。这一效应被称之为壁厚效应,主要与以下 3 个方面因素有关^[61]:

(1)采用断裂力学可对壁厚效应进行解释。由式(3)和式(4)可知,应力强度因子幅 ΔK 表达式中包含焊缝形状引起的焊缝放大因子 M_k , M_k 与几何参数焊缝角和焊趾曲率半径等有关,研究表明, M_k 随裂纹深度与板厚比的减小而迅速增大,说明在初裂缝深度相同前提下, M_k 随板厚增加而迅速增大,也就增大了应力强度因子范围,使裂纹扩展速率变快,缩短了裂纹扩展寿命。

表 3 各规范热点应力法中壁厚效应修正系数公式

规范	设计公式	基准壁厚 t_R /mm	壁厚效应修正系数公式
CIDECT	$\lg(S_t) = \frac{1}{3}[12.476 - \lg(N)] + 0.06\lg(N)\lg(\frac{16}{t_R})$	16	$S_t = S_{tR}(\frac{t_R}{t})^{-0.06\lg(N)}$
AWS 和 API	$N = 2 \times 10^6 (\frac{S_t}{79})^{-3.74}$	16	$S_t = S_{tR}(\frac{t}{t_R})^{1/4}$
DNV	$\lg(S_t) = \frac{1}{3}[12.164 - \lg(N)]$	32	$S_t = S_{tR}(\frac{t}{t_R})^{1/4}$

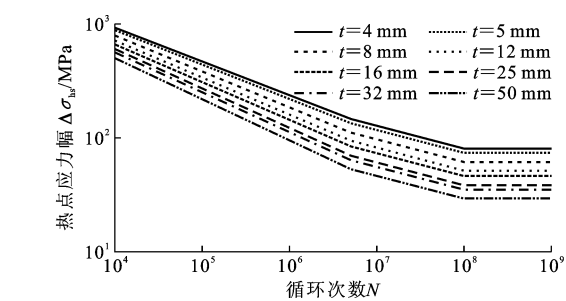


图 11 CIDECT 规范中考虑壁厚效应的热点应力幅 S_{hs} - N 曲线
Fig. 11 Hot Spot Stress Range S_{hs} - N Curves Considering Wall Thickness Effect in CIDECT

3 焊接管节点结构形式发展

针对传统的圆形钢管和矩形钢管节点疲劳性

(2)疲劳寿命的确定与结构的缺陷密切相关,钢管壁厚的增加,提高了结构中缺陷产生的概率,更易发生疲劳破坏。

(3)钢材越厚,材料的晶粒结构越粗糙,屈服强度相应降低,而残余应力增大,材料的冲击韧性降低,增加了氢致裂纹产生的概率。

基于上述分析,壁厚效应在疲劳评估时不应忽视,考虑壁厚效应的热点应力幅 S_{hs} - N 曲线可利用如下公式描述,即

$$S_t = S_{tR}(\frac{t_R}{t})^c \tag{16}$$

式中: c 为常数,由疲劳试验得到; t_R 为基准壁厚; S_{tR} 为基准壁厚节点的容许应力幅,其他壁厚节点的容许应力幅 S_t 通过该公式修正得到。

表 3 给出了 CIDECT 规范、AWS 和 API 规范(两规范中 S_{hs} - N 曲线采用相同表达式)、DNV 规范中的热点应力法疲劳强度表达式,并给出壁厚效应修正系数公式。由式(16)和表 3 可知,各规范对 S_{hs} - N 曲线修正后,将得到一组对应不同壁厚的曲线,图 11 为 CIDECT 规范中考虑壁厚效应修正后的一组 S_{hs} - N 曲线。

能,学者已经开展了几十年的研究,并达成共识,推荐采用热点应力法对其进行评定。由表 2 可以看出,20 世纪 90 年代是热点应力法中 SCF 计算公式提出的高峰时期,进入 21 世纪,已形成了较为系统的热点应力评估方法,学者们对传统管节点的疲劳强度和疲劳损伤机理也有了基本的认识,未来研究重点主要是考虑焊接残余应力、复杂应力场等问题,对现有热点应力法进一步完善。此外,相比海洋平台结构和房屋建筑结构,桥梁工程中管节点的几何尺寸更大,现有规范中的几何尺寸适用范围需进一步扩展,如 CIDECT 规范中矩形钢管节点热点应力幅 S_{hs} - N 曲线钢管壁厚适用范围为 4~16 mm,但桥梁中钢管节点壁厚远远大于 16 mm,因此,应补充对实桥壁厚尺寸的研究。

在传统的圆形和矩形钢管节点基础上,学者提出了多种新型节点,使节点形式得到了进一步发展。目前,在大跨径桥梁中最常用的方法是在主管内填充混凝土形成钢管混凝土节点,如图 12(a),(b)所示,在此基础上,刘永健等^[103]提出主管内设通长开

孔加劲肋,形成 PBL 加劲型钢管混凝土节点,如图 12(c),(d)所示,此外,通过改变支、主管截面形式,提出了圆管-方管节点[12(e)]、鸟嘴式节点,根据支、主管截面形式,分为方形鸟嘴式节点[12(f)]和钻石鸟嘴式节点[12(g)]。

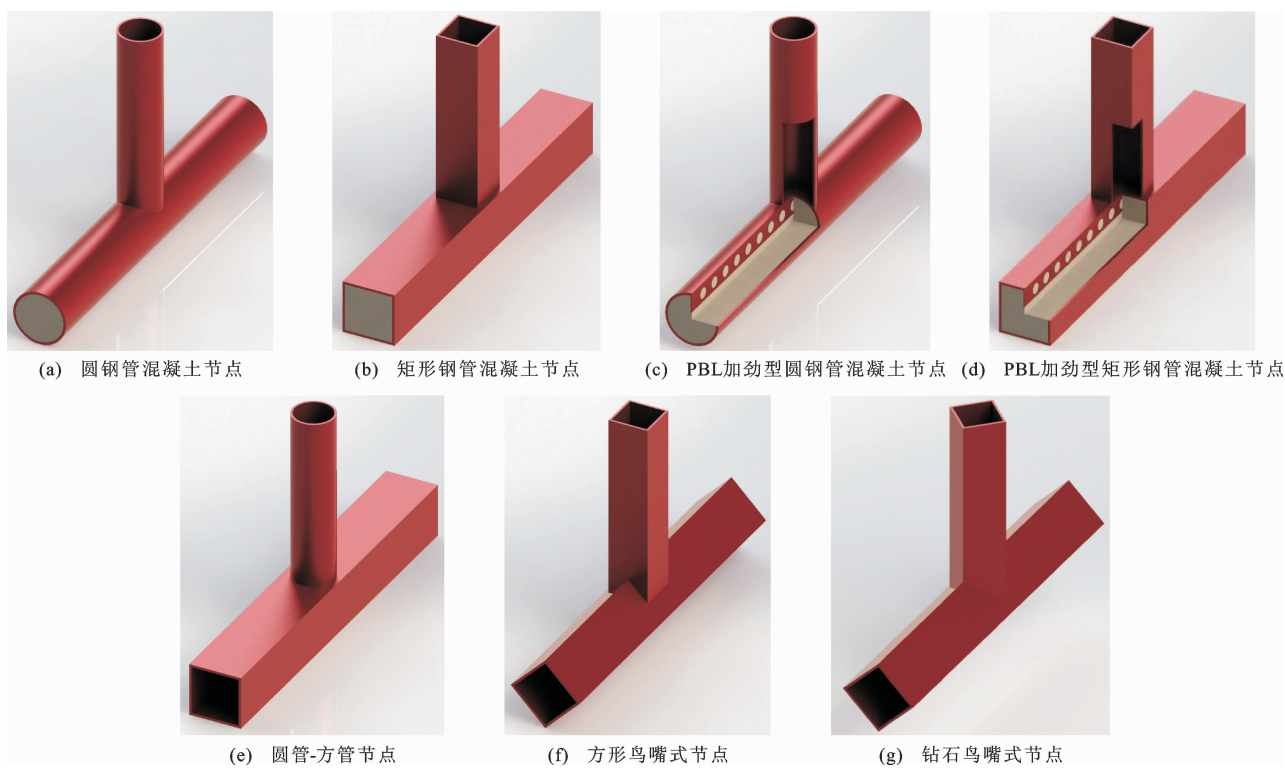


图 12 各类新型节点构造
Fig. 12 Structures of New-type Joints

新型节点对疲劳性能的提高主要是通过改善支、主管相贯线处的节点刚度,使此部位刚度分布更均匀,对应的 SCF 大幅降低,其疲劳寿命更高,因此,研究新型节点的疲劳性能,重点在于分析其 SCF 水平。本文将对各新型节点 SCF 的研究现状进行简要介绍。

3.1 钢管混凝土节点

表 4 列出了钢管混凝土节点 SCF 研究汇总。童乐为等^[104-106]开展了 11 个圆形钢管混凝土 T 形节点支管轴力疲劳试验,研究发现:主管内填混凝土限制了钢管的弯曲变形,使 SCF 相比圆形钢管节点明显降低,并且相比圆形钢管节点最大 SCF 常发生在鞍点部位,填充混凝土后冠点部位 SCF 最大,同时受拉节点的 SCF 大于受压节点,说明在支管拉力荷载作用下钢管和混凝土会发生脱黏,钢管仍产生一定的弯曲变形;节点最终的疲劳破坏模式与圆形钢管节点基本一致。刁砚等^[5,107]以干海子特大桥为研究背景,设计钢管混凝土桁架节段,对节段中 Y

形节点 SCF 进行测试,得到 3 个试件 SCF 值在 2.91~3.46 之间,其水平约为 CIDECT 规范计算得到的同尺寸圆形钢管 Y 形节点 SCF 的 1/4。Kim 等^[108]在模型试验的基础上,对圆形钢管混凝土 N 形节点进行了系列有限元分析,并提出了相应的 SCF 计算公式,研究结果表明:圆形钢管混凝土 N 形节点 SCF 相比钢管节点明显降低,且 SCF 与管内混凝土强度无关;N 形节点两支管间隙对其 SCF 也有影响,搭接节点的 SCF 为间隙节点的 2 倍。Udomworarat 等^[57-58]开展了圆形钢管和钢管混凝土节点疲劳性能对比试验,结果表明,圆形钢管混凝土最大 SCF 较圆形钢管节点减小 30%~40%。Droogne 等^[109-110]针对圆形钢管混凝土 T 形节点也开展了相应试验和有限元分析,均发现 SCF 明显降低。

针对矩形钢管混凝土节点,Mashiri 等^[99]完成了 17 个 T 形节点支管面内受弯作用下 SCF 试验研究,发现最大 SCF 较矩形钢管节点减小 15%~

表 4 钢管混凝土节点 SCF 研究汇总

Tab. 4 Summary of SCF Research on Concrete Filled Steel Tube Joints

数据来源	节点类型	β	2γ	τ	$\theta/(^{\circ})$	荷载形式	分析方法	试件数量/个
文献[104],[106]	圆形钢管 T 形	0.540~1.000	16.92~30.62	0.56~1.00	90	支管轴力	试验	11
文献[5],[107]	圆形钢管 Y 形	0.500	20.30	0.80	45	支管轴力	试验,有限元	3
文献[108]	圆形钢管 N 形	0.320~0.900	21.40~44.40	0.27~1.00	30~90	支管轴力	有限元	126
文献[109]	圆形钢管 T 形	0.480	15.26	0.34	90	支管轴力,支管面内弯矩	有限元	6
文献[110]	圆形钢管 T 形	0.500	28.56	0.50	90	支管轴力,支管面内弯矩,支管面外弯矩	试验	3
文献[57],[58]	圆形钢管 K 形	0.680	46.84	1.00	60	支管轴力	试验,有限元	4
文献[99]	矩形钢管 T 形	0.350~0.670	23.00~33.00	0.50~1.00	90	支管面内弯矩	试验	17
文献[69]	矩形钢管 T 形	0.400	27.00	1.00	90	支管轴力,支管面内弯矩,支管面外弯矩	有限元	3
文献[111]	矩形钢管 X 形	0.625~0.750	26.70	1.00	60	支管轴力	试验,有限元	3
文献[114]	矩形钢管 X 形	0.400~1.000	12.50~25.00	0.25~1.00	90	支管轴力,支管面内受弯,主管轴力,主管面内弯矩	有限元	320

80%，平均减小 40%。程高等^[69,111-112]均采用有限元模拟,对 T 形和 X 形节点进行分析,研究表明:矩形钢管混凝土节点 SCF 比矩形钢管节点降低 25%左右,同时李鸿升^[112]给出了 X 形节点支管受拉和支管面内受弯荷载作用下的 SCF 计算公式。

综上所述,主管内填混凝土后,支、主管相贯线部位的应力分布更均匀,主管表面的弯曲应力减小,因此 SCF 水平有所降低,支管受压节点 SCF 降低更明显,因此节点的疲劳寿命显著提高,但是疲劳破坏模式基本不变。

3.2 PBL 加劲型钢管混凝土节点

表 5 列出了 PBL 加劲型钢管混凝土节点 SCF 研究汇总。Udomworarat 等^[58]完成了 4 个 K 形节点疲劳试验,试验中设计了圆形钢管、圆形钢管混凝土和 PBL 加劲型圆形钢管混凝土 3 类节点,对比 SCF 测试结果发现,PBL 加劲型圆形钢管混凝土节点 SCF 最低。Liu 等^[111]开展了支管受拉 X 型矩形钢管混凝土和 PBL 加劲型矩形钢管混凝土节点疲劳试验,设置 PBL 后其疲劳寿命提高到 10 倍。程高等^[69]对 PBL 加劲型矩形钢管混凝土 T 形节点 SCF 进行了有限元分析,对支管轴力、支管面内弯矩和面外弯矩 3 种不同荷载形式进行研究,结果表

明,相比矩形钢管混凝土节点,其 SCF 降低 50%以上。李鸿升^[112]针对 PBL 加劲型矩形钢管混凝土 X 形支管受拉节点开展了有限元分析,研究表明,支、主管相贯线处应力分布均匀,PBL 部位主管表面刚度增大,应力水平有所提高,成为 SCF 最大值可能发生位置,在分析时应予以考虑,最大 SCF 相比矩形钢管节点平均下降 65%。

总结现有研究成果可以发现,在钢管混凝土节点内设 PBL 后其 SCF 进一步降低,改善机理为:混凝土骨料穿过加劲肋开孔形成混凝土榫,混凝土榫与 PBL 加劲肋间的抗剪作用对钢管顶板起到一定抗拔作用,限制了顶板的弯曲变形。矩形钢管、矩形钢管混凝土节点和 PBL 加劲型矩形钢管混凝土节点在相同荷载 P 作用下支管的应力分布如图 13 所示。由图 13 可以看出,应力 $\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$,由此可知矩形钢管节点角点部位应力水平最高,易发生疲劳破坏,而 PBL 加劲型矩形钢管混凝土节点虽然 PBL 加劲肋部位应力水平有所提高,但整体应力较低,且分布均匀,由此预见其疲劳寿命最高,矩形钢管混凝土节点疲劳性能则介于两者之间。

3.3 圆管-方管节点

表 6 列出了圆管-方管节点 SCF 研究汇总。

表 5 PBL 加劲型钢管混凝土节点 SCF 研究汇总

Tab. 5 Summary of SCF Research on Concrete Filled Steel Tube Joints Stiffened with PBL

数据来源	节点类型	β	2γ	τ	$\theta/(^{\circ})$	荷载形式	分析方法	试件数量/个
文献[58]	圆形钢管 K 形	0.680	46.84	1.00	60	支管轴力	试验,有限元	4
文献[111]	矩形钢管 X 形	0.625~0.750	26.70	1.00	60	支管轴力	试验	3
文献[69]	矩形钢管 T 形	0.400	27.00	1.00	90	支管轴力, 支管面内弯矩, 支管面外弯矩	有限元	3
文献[112]	矩形钢管 X 形	0.400~1.000	12.50~25.00	0.25~1.00	90	支管轴力	有限元	11

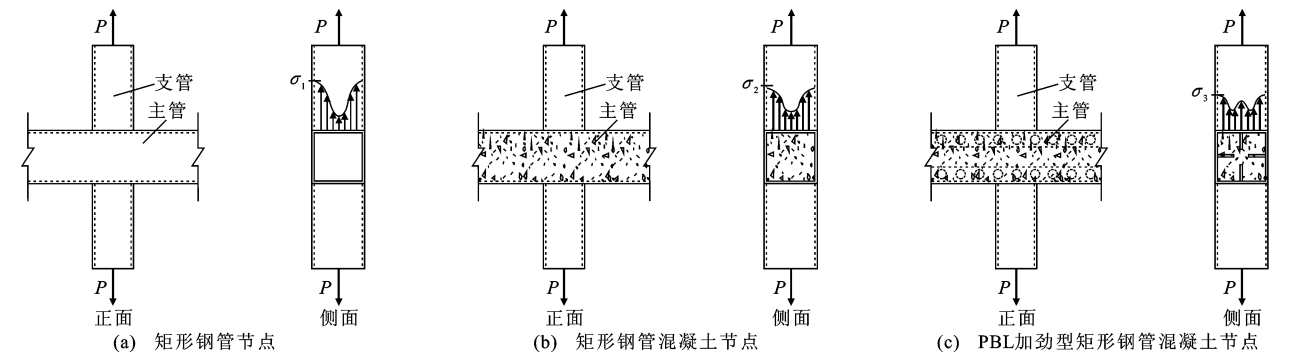


图 13 相同荷载下各节点支管应力分布

Fig. 13 Stress Distribution on Brace of Different Joints Under Same Load

表 6 圆管-方管节点 SCF 研究汇总

Tab. 6 Summary of SCF Research on CHS-RHS Joints

数据来源	节点类型	β	2γ	τ	$\theta/(^{\circ})$	荷载形式	分析方法	试件数量/个
文献[113]	T 形	2.40~3.60	0.26~0.80	0.45~0.80	90	支管轴力	试验	9
文献[114]	T 形	0.28~0.80	18.00~31.80	0.67~1.00	90	支管面外弯矩	试验	6
文献[115]	T 形	0.28~0.99	18.00~31.80	0.63~1.00	90	支管轴力, 支管面内弯矩	试验	8
文献[116]	T 形	0.34~0.64	25.00~33.34	0.67~0.97	90	支管面内弯矩	试验	19
文献[36],[79]	T 形	0.44~0.90	16.66~31.25	0.33~0.83	90	支管轴力, 支管面内弯矩	试验, 有限元	16

Gandhi 等^[113]开展了 9 个圆管-方管支管受拉节点 SCF 试验测试,将其与传统的圆管节点和方管节点进行对比,其 SCF 大于圆管节点,小于方管节点,同时给出了 SCF 随量纲一的几何参数 $\beta, 2\gamma, \tau$ 变化情况。Bian 等^[114-115]完成了 4 个支管轴力、4 个支管面内弯矩和 6 个支管面外弯矩作用下的圆管-方管节点 SCF 试验,不同荷载下 SCF 水平基本一致,均介于圆管节点和方管节点之间。Mashiri 等^[116]完成了 19 个薄板($t < 4\text{ mm}$)圆管-方管支管面内受弯节点 SCF 试验,给出 SCF 计算公式。Tong 等^[79]针对支管轴力和支管面内弯矩作用下圆管-方管节点 SCF 开展了系统的试验和有限元分析,提出了相应的 SCF 计算公式。Packer 等^[117]提出支管转化法,将圆管-方管节点等效为方管-方管节点,按已有的方管-方管节点疲劳设计方法进行计算。

圆管-方管节点的提出主要在于方钢管作为主管使支、主管相贯线部位构造简单,加工方便,而圆钢管截面作为支管,相贯线部位节点刚度分布均匀,无较大的突变,利于承受疲劳荷载。现有研究也得到了统一的结论:该新型节点 SCF 介于圆钢管和矩形钢管节点之间。

3.4 鸟嘴式节点

表 7 列出了鸟嘴式钢管节点 SCF 研究汇总。Tong 等^[102,118-119]开展了 7 个支管轴力作用下钻石鸟嘴式 T 形节点疲劳试验,基于试验结果,进行了支管轴力、支管面内弯矩、主管轴力和主管面内弯矩 4 种荷载形式下 SCF 有限元研究。Cheng 等^[66,100,120]针对方形鸟嘴式 T 形节点,完成了 12 个支管轴力和 9 个支管面外弯矩试验,并开展了支管轴力有限元分析。通过研究发现,2 类节点的 SCF 水平基本

表 7 鸟嘴式钢管节点 SCF 研究汇总

Tab. 7 Summary of SCF Research on Bird-beak SHS Joints

数据来源	节点类型	β	2γ	τ	$\theta/(^{\circ})$	荷载形式	分析方法	试件数量/个
文献[102],[118]	钻石鸟嘴式 T 形	0.40~0.72	20.83~31.25	0.50~0.83	90	支管轴力	试验	7
文献[119]	钻石鸟嘴式 T 形	0.40~0.80	12.50~25.00	0.30~1.00	90	支管轴力, 支管面内弯矩, 主管轴力, 主管面内弯矩	有限元	
文献[120]	方形鸟嘴式 T 形	0.45~0.75	16.67~25.00	0.50~0.83	90	支管轴力	试验	12
文献[66]	方形鸟嘴式 T 形	0.50~0.90	12.50~25.00	0.40~0.80	90	支管轴力	有限元	
文献[100]	方形鸟嘴式 T 形	0.45~0.75	16.67~25.00	0.50~0.83	90	支管面外弯矩	试验	9

一致,热点应力外推区应力分布符合二次变化规律,与矩形钢管节点一致,最大 SCF 普遍低于矩形钢管节点,且 β 越小这种减小幅度越明显,当 $\beta>0.75$ 时,其 SCF 值可能高于矩形钢管节点。

鸟嘴式节点最早出于美观角度提出,总结上述研究成果可知,在某些尺寸范围内,鸟嘴式节点的疲劳性能优于传统的矩形钢管节点。

4 结 语

(1)焊接管节点疲劳性能评估常用的 4 种方法中,名义应力法应用最广,但在某些节点参数情况下其对疲劳强度的评估过于保守;热点应力法由于其计算精度较高,使用相对方便,成为国内外学者首推的评估方法,但仅列入部分国外规范,需进一步完善;切口应力法虽然计算精度高,但实施难度大,尚未在规范中使用;上述 3 种方法主要用于管节点设计阶段疲劳评估,断裂力学法则通常被用于剩余疲劳寿命的评估,在管节点运营期检修加固等方面应用较广。

(2)针对国内外最推崇的热点应力法,国内外学者针对传统的圆形钢管和矩形钢管节点,从节点疲劳效应 SCF 和抗力 S_{hs} -N 曲线 2 个方面开展了较为完善的研究。明确了 SCF 最大值可能发生位置和外推区域,并给出 SCF 外推简化计算公式;对 SCF 试验测量和有限元模拟方法进行探索,提出多种 SCF 计算公式;完成系列疲劳试验研究,提出不同的考虑壁厚效应的 S_{hs} -N 曲线,并列入各规范中。目前,国内外虽然已取得了丰富的研究成果,但各规范对于 SCF 有限元模拟方法和 S_{hs} -N 曲线规定仍存在不统一,有待进一步完善,此外,焊接残余应力、复杂应力场、桥梁管节点尺寸适用范围等问题也将是热点应力法未来的研究方向。

(3)管节点结构形式得到了进一步发展,各种新型节点应运而生。对新型节点 SCF 研究现状进行

总结发现:主管内填混凝土形成钢管混凝土节点,其主管变形受到管内混凝土约束,弯曲应力减小,SCF 水平有所降低,降幅在 25% 以上;在此基础上,主管内设 PBL 加劲型形成 PBL 加劲型钢管混凝土节点,可进一步限制主管外凸变形,SCF 降幅在 50% 以上;从加工方便、构造美观等角度出发,提出了圆管-方管节点和鸟嘴式节点,其 SCF 普遍高于圆形钢管节点,但低于矩形钢管节点。针对新型节点,尚未形成完善的 SCF 计算公式和 S_{hs} -N 曲线,仍需进一步研究。

参考文献:

References:

[1] HAN L H, LI W, BJORHOVDE R. Developments and Advanced Applications of Concrete-filled Steel Tubular (CFST) Structures;Members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 100: 211-228.

[2] WARDENIER J, PACKER J A, ZHAO X L, et al. Hollow Sections in Structural Applications[M]. Rotterdam: Bouwen Met Staal, 2002.

[3] 叶卓棋, 杨 健, 刘永健, 等. 部分填充混凝土钢管结构桥梁研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(2): 96-101.

YE Zhuo-qi, YANG Jian, LIU Yong-jian, et al. Research on Partially Concrete-filled Steel Tubular Bridges[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(2): 96-101.

[4] MATO F M, CORNEJO M O, SANCHEZ R A E. Viaduct over Ulla River in the Atlantic High Speed Railway Line: A Composite (Steel-concrete) Truss World Record [J]. Hormigon y Acero, 2015, 66 (277): 1-25.

[5] 刁 砚. 钢管混凝土桥管节点疲劳性能试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

DIAO Yan. Experimental Research on Fatigue Performance of Tubular Joints in Concrete-filled Steel

- Bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [6] WANG Q, NAKAMURA S, CHEN B C, et al. Fatigue Damage of a Half-through Concrete-filled Steel Tubular Trussed Arch Bridge in China[C]//CHOI C K. Proceedings of the 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Daejeon: Techno Press, 2015.
- [7] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2007.
CHEN Bao-chun. Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridges[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [8] CHEN B C, WANG T L. Overview of Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges in China[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2009, 14(2): 70-80.
- [9] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 50-61.
CHEN Bao-chun, WEI Jian-gang, ZHOU Jun, et al. Application of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridges in China: Current Status and Prospects[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 50-61.
- [10] 李泽生. 钢管混凝土结构在紫洞大桥工程中的应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(5): 174-178.
LI Ze-sheng. Applications of Concrete Filled Steel Tubular Structures in Zidong Bridge[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997, 30(5): 174-178.
- [11] LIU Y J, XIONG Z H, LUO Y L, et al. Double-composite Rectangular Truss Bridge and Its Joint Analysis[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(4): 249-257.
- [12] 李小珍, 任伟平, 卫星, 等. 现代钢桥新型结构型式及其疲劳问题分析[J]. 钢结构, 2006, 21(5): 50-55.
LI Xiao-zhen, REN Wei-ping, WEI Xing, et al. New Structural Types and Fatigue Problems of Modern Steel Bridge Structures[J]. Steel Construction, 2006, 21(5): 50-55.
- [13] PUTHLI R S, WARDENIER J, DE KONING C H M, et al. Numerical and Experimental Determination of Strain (Stress) Concentration Factors of Welded Joints Between Square Hollow Sections[J]. HERON, 1988, 32(2): 1-50.
- [14] VAN WINGERDE A M. The Fatigue Behaviour of T- and X-joints Made of Square Hollow Sections[J]. HERON, 1992, 37(2): 1-182.
- [15] ZHAO X L, HERION S, PACKER J A, et al. Design Guide for Circular and Rectangular Hollow Section Joints Under Fatigue Loading [M]. Koln: Verlag TUV Rheinland, 2001.
- [16] IIW Doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components[S].
- [17] JTG D64—2015, 公路钢结构桥梁设计规范[S].
JTG D64—2015, Specifications for Design of Highway Steel Bridge[S].
- [18] BS EN 1993-1-9: 2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures — Part 1-9: Fatigue[S].
- [19] ANSI/AWS D1. 1-2000, Structural Welding Code — Steel[S].
- [20] API-PR2A, Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms[S].
- [21] DNV-RP-C203, Fatigue Design of Offshore Steel Structures[S].
- [22] HOBACHER A F. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components[M]. Heidelberg: Springer International Publishing, 2016.
- [23] HOBACHER A F. The New IIW Recommendations for Fatigue Assessment of Welded Joints and Components — A Comprehensive Code Recently Updated [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(1): 50-58.
- [24] MADDOX S J. Review of Fatigue Assessment Procedures for Welded Aluminium Structures[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(12): 1359-1378.
- [25] SCHIJVE J. Fatigue of Structures and Materials in the 20th Century and the State of the Art[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(8): 679-702.
- [26] KYUBA H, DONG P. Equilibrium-equivalent Structural Stress Approach to Fatigue Analysis of a Rectangular Hollow Section Joint[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(11): 85-94.
- [27] DONG P. A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Analysis of Welded Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(10): 865-876.
- [28] XIAO Z G, YAMADA K. A Method of Determining Geometric Stress for Fatigue Strength Evaluation of Steel Welded Joints[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(12): 1277-1293.
- [29] FRICKE W. Fatigue Analysis of Welded Joints: State of Development[J]. Marine Structures, 2003, 16(3): 185-200.
- [30] AKHLAGHI F Z. Welding Simulation and Fatigue Assessment of Tubular K-joints in High-strength

- Steel[D]. Lausanne:Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,2014.
- [31] RADAJ D. Review of Fatigue Strength Assessment of Nonwelded and Welded Structures Based on Local Parameters[J]. *International Journal of Fatigue*, 1996,18(3):153-170.
- [32] RADAJ D,SONSINO C M,FRICKE W. Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches[M]. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.
- [33] RADAJ D,SONSINO C M,FRICKE W. Recent Developments in Local Concepts of Fatigue Assessment of Welded Joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009,31(1):2-11.
- [34] GURNEY T R,MADDOX S J. A Re-analysis of Fatigue Data for Welded Joints in Steel[J]. *Welding Research International*, 1973,3(4):1-54.
- [35] OLIVIER R,RITTER D. Catalogue of S-N Curves of Welded Joints in Structural Steel[R]. Dusseldorf: DVS-Verlag, 1979.
- [36] 郑鸿志. 圆管-方管焊接节点疲劳性能和设计方法研究[D]. 上海:同济大学,2008.
ZHENG Hong-zhi. The Fatigue Behavior and Design Method of CHS-SHS Welded Joints[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [37] CECS 280:2010, 钢管结构技术规程[S].
CECS 280:2010, Technical Specification for Structures with Steel Hollow Sections[S].
- [38] SONSINO C M,FRICKE W,DE BRUYNE F, et al. Notch Stress Concepts for the Fatigue Assessment of Welded Joints — Background and Applications[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012,34(1):2-16.
- [39] FISCHER C,FRICKE W,RIZZO C M. Review of the Fatigue Strength of Welded Joints Based on the Notch Stress Intensity Factor and SED Approaches[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016,84:59-66.
- [40] SCHIJVE J. Fatigue Predictions of Welded Joints and the Effective Notch Stress Concept[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012,45:31-38.
- [41] RADAJ D,SONSINO C M,FLADE D. Prediction of Service Fatigue Strength of a Welded Tubular Joint on the Basis of the Notch Strain Approach[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998,20(6):471-480.
- [42] DE BACK J. The Design Aspects and Fatigue Behaviour of Tubular Joints[C]//NOORDHOEK C, DE BACK J. Proceedings of the Third International ECSC Offshore Conference on Steel in Marine Structures. Amsterdam:Elsevier, 1987:205-224.
- [43] YANG Z M, LIE S T, GHOW M. Fatigue Crack Growth Analysis of a Square Hollow Section T-joint[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63(9):1184-1193.
- [44] CHEN T, XIAO Z G, ZHAO X L, et al. A Boundary Element Analysis of Fatigue Crack Growth for Welded Connections Under Bending[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013,98:44-51.
- [45] TANAKA S, KAWAHARA T, OKADA H. Study on Crack Propagation Simulation of Surface Crack in Welded Joint Structure[J]. *Marine Structures*, 2014, 39:315-334.
- [46] 高仁良, 陈廷国, 睦 晓, 等. 管节点疲劳裂纹扩展规律和寿命估算[J]. *大连理工大学学报*, 1995, 35(2): 222-226.
GAO Ren-liang, CHEN Ting-guo, SUI Xiao, et al. Fatigue Crack Extending Pattern and Estimation of Fatigue Life of Tubular Joints[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1995, 35(2):222-226.
- [47] PARIS P, ERDOGAN F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963,85(4):528-533.
- [48] 沈祖炎, 童乐为. 方管焊接节点的疲劳强度[J]. *钢结构*, 1992, 7(4):50-55.
SHEN Zu-yan, TONG Lei-wei. Fatigue Strength of SHS Welded joints[J]. *Steel Construction*, 1992, 7(4):50-55.
- [49] SAINI D S, KARMAKAR D, RAY-CHAUDHURI S. A Review of Stress Concentration Factors in Tubular and Non-tubular Joints for Design of Offshore Installations[J]. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2016,1(3):186-202.
- [50] GURNEY J. Fatigue of Welded Structures[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
- [51] WARDENIER J. Hollow Section Joints[M]. Delft: Delft University Press, 1982.
- [52] LEE J M, SEO J K, KIM M H, et al. Comparison of Hot Spot Stress Evaluation Methods for Welded Structures[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2010,2(4):200-210.
- [53] 贾法勇, 霍立兴, 张玉凤, 等. 热点应力有限元分析的主要影响因素[J]. *焊接学报*, 2003, 24(3):27-30.
JIA Fa-yong, HUO Li-xing, ZHANG Yu-feng, et al. Key Influence Factors in Hot Spot Stress FEM Analysis[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24(3):27-30.
- [54] FRICKE W. Evaluation of Hot Spot Stresses in Complex Welded Structures [C]//Tokyo Institute of

- Technology, Proceedings of the IIW Fatigue Seminar, Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 2002; 165-176.
- [55] LIE S T, LI G, CEN Z. Effect of Brace Wall Thickness and Weld Size on Stress Intensity Factors for Welded Tubular T-joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 53(2): 167-182.
- [56] MASHIRI F R, ZHAO X L, GRUNDY P. Effects of Weld Profile and Undercut on Fatigue Crack Propagation Life of Thin-walled Cruciform Joint[J]. Thin-walled Structures, 2001, 39(3): 261-285.
- [57] UDOMWORARAT P, MIKI C, ICHIKAWA A, et al. Fatigue and Ultimate Strengths of Concrete Filled Tubular K-joints on Truss Girder[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 46A: 1627-1635.
- [58] UDOMWORARAT P, MIKI C, ICHIKAWA A, et al. Fatigue Performance of Composite Tubular K-joints for Truss Type Bridge[J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 2002, 19(2): 65-79.
- [59] SCHUMACHER A, NUSSBAUMER A. Experimental Study on the Fatigue Behaviour of Welded Tubular K-joints for Bridges[J]. Engineering Structures, 2006, 28(5): 745-755.
- [60] EFTHYMIOU M, DURKIN S. Stress Concentration in T/Y and Gap/overlap K-joints[C]//Elsevier, Proceedings of the 4th International Conference on Behaviour of Offshore Structures, Amsterdam: Elsevier, 1985: 429-440.
- [61] VAN WINGERDE A M, PACKER J A, WARDENIER J. Criteria for the Fatigue Assessment of Hollow Structural Section Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 35(1): 71-115.
- [62] SHAO Y B. Fatigue Behaviour of Uniplanar CHS Gap K-joints Under Axial and In-plane Bending Loads[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2004.
- [63] FRATER G S. Performance of Welded Rectangular Hollow Structural Section Trusses[D]. Toronto: University of Toronto, 1991.
- [64] VAN DELFT D R V, NOORDHOEK C, DA RE M L. The Results of the European Fatigue Tests on Welded Tubular Joints Compared with SCF Formulas and Design Lines[C]//NOORDHOEK C, DE BACK J. Proceedings of the Third International ECSC Offshore Conference on Steel in Marine Structures, Amsterdam: Elsevier, 1987: 565-577.
- [65] FENG R, YOUNG B. Stress Concentration Factors of Cold-formed Stainless Steel Tubular X-joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 91: 26-41.
- [66] CHENG B, QIAN Q, ZHAO X L. Numerical Investigation on Stress Concentration Factors of Square Bird-beak SHS T-joints Subject to Axial Forces[J]. Thin-walled Structures, 2015, 94: 435-445.
- [67] POUTIAINEN I, TANSKANEN P, MARQUIS G. Finite Element Methods for Structural Hot Spot Stress Determination — A Comparison of Procedures[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(11): 1147-1157.
- [68] TOVO R, LAZZARIN P. Relationships Between Local and Structural Stress in the Evaluation of the Weld Toe Stress Distribution[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(10): 1063-1078.
- [69] 程 高, 刘永健, 邱洁霖, 等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土不等宽 T 型节点应力集中系数分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4): 74-79.
- CHENG Gao, LIU Yong-jian, QIU Jie-lin, et al. Analysis of Stress Concentration Factor on Concrete-filled Rectangular Steel Tube T-joints Stiffened with PBL[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 74-79.
- [70] 俞文龙. 矩形钢管混凝土 T 型受拉节点力学性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- YU Wen-long. Behavior Analysis of Rectangular Concrete-filled Steel Tubular T-joint Under Tension Load[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [71] CHATTOPADHYAY A, GLINKA G, EL-ZEIN M, et al. Stress Analysis and Fatigue of Welded Structures[J]. Welding in the World, 2011, 55(7/8): 2-21.
- [72] ROMEIJN A. Stress and Strain Concentration Factors of Welded Multiplanar Tubular Joints[D]. Delft: Delft University of Technology, 1994.
- [73] HERION S. Multiplanar K-joints Made of RHS[D]. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 1994.
- [74] PEY L P, SOH A K, SOH C K. Partial Implementation of Compatibility Conditions in Modeling Tubular Joints Using Brick and Shell Elements[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1995, 20(2): 127-138.
- [75] SHAO Y B, LIE S T, CHIEW S P, et al. Evaluation of Geometrical Effect on Stress Distribution for Tubular T-joints Under Axial Load[J]. International Journal of Space Structures, 2006, 21(2): 77-91.
- [76] SHAO Y B, DU Z F, LIE S T. Prediction of Hot Spot Stress Distribution for Tubular K-joints Under Basic Loadings[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(10/11): 2011-2026.

- [77] LOZANO-MINGUEZ E, BRENNAN F P, KOLIOS A J. Reanalysis of Offshore T-joint Fatigue Life Predictions Based on a Complete Weld Profile Model [J]. *Renewable Energy*, 2014, 71: 486-494.
- [78] FENG R, YOUNG B. Design of Cold-formed Stainless Steel Tubular T- and X-joints [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(3): 421-436.
- [79] TONG L W, ZHENG H Z, MASHIRI F R, et al. Stress-concentration Factors in Circular Hollow Section and Square Hollow Section T-connections: Experiments, Finite-element Analysis, and Formulas [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(11): 1866-1881.
- [80] KUANG J G, POTVIN A B, LEICK R D. Stress Concentration in Tubular Joints [C]//AIME. Proceedings of Offshore Technology Conference. Wilkes-Barre: AIME, 1975: 593-702.
- [81] KUANG J G, POTVIN A B, LEICK R D, et al. Stress Concentration in Tubular Joints [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1977, 17(4): 287-299.
- [82] IIW Doc. XV-582-85, Recommended Fatigue Design Procedure for Hollow Section Joints: Part I — Hot Spot Stress Method for Nodal Joints [S].
- [83] DIJKSTRA O D, VAN FOEKEN R J, ROMEIJN A, et al. Fatigue Design Guide for Circular and Rectangular Hollow Section Multiplanar Joints [R]. Delft: Delft University of Technology, 1996.
- [84] KARAMANOS S A, ROMEIJN A, WARDENIER J. Stress Concentrations and Joint Flexibility Effects in Multi-planar Welded Tubular Connections for Fatigue Design [R]. Delft: Delft University of Technology, 1997.
- [85] KARAMANOS S A, ROMEIJN A, WARDENIER J. Stress Concentrations in Tubular Gap K-joints: Mechanics and Fatigue Design [J]. *Engineering Structures*, 2000, 22(1): 4-14.
- [86] HELLIER A K, CONNOLLY M P, KARE R F, et al. Prediction of the Stress Distribution in Tubular Y- and T-joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 1990, 12(1): 25-33.
- [87] HELLIER A K, CONNOLLY M P, DOVER W D. Stress Concentration Factors for Tubular Y- and T-joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 1990, 12(1): 13-23.
- [88] CHANG E, DOVER W D. Stress Concentration Factor Parametric Equations for Tubular X and DT Joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 1996, 18(6): 363-387.
- [89] CHANG E, DOVER W D. Prediction of Stress Distributions Along the Intersection of Tubular Y and T-joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(4): 361-381.
- [90] MORGAN M R, LEE M M K. New Parametric Equations for Stress Concentration Factors in Tubular K-joints Under Balanced Axial Loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 1997, 19(4): 309-317.
- [91] MORGAN M R, LEE M M K. Parametric Equations for Distributions of Stress Concentration Factors in Tubular K-joints Under Out-of-plane Moment Loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20(6): 449-461.
- [92] MORGAN M R, LEE M M K. Prediction of Stress Concentrations and Degrees of Bending in Axially Loaded Tubular K-joints [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1998, 45(1): 67-97.
- [93] VAN WINGERDE A M, PACKER J A, WARDENIER J. New Guidelines for Fatigue Design of HSS Connections [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 12(2): 125-132.
- [94] VAN WINGERDE A M, PACKER J A, WARDENIER J. Simplified SCF Formulae and Graphs for CHS and RHS K- and KK-connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 57(3): 221-252.
- [95] CHIEW S P, SOH C K, WU N W. General SCF Design Equations for Steel Multiplanar Tubular XX-joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(4): 283-293.
- [96] GHU W M, FUNG T C, SOH C K. Stress and Strain Concentration Factors of Completely Overlapped Tubular K(N) Joints [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(1): 21-29.
- [97] PUTHLI R, HERION S. Stress Concentration and Secondary Moment Distribution in RHS Joints for Fatigue Design [R]. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 1996.
- [98] CHIEW S P, LEE C K, LIE S T, et al. Fatigue Behaviors of Square-to-square Hollow Section T-joint with Corner Crack. I: Experimental Studies [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, 74(5): 703-720.
- [99] MASHIRI F R, ZHAO X L. Square Hollow Section (SHS) T-joints with Concrete-filled Chords Subjected to In-plane Fatigue Loading in the Brace [J]. *Thin-walled Structures*, 2010, 48(2): 150-158.
- [100] CHENG B, QIAN Q, ZHAO X L. Stress Concentration Factors and Fatigue Behavior of Square Bird-beak SHS T-joints Under Out-of-plane Bending [J].

- Engineering Structures, 2015, 99: 677-684.
- [101] 程 睿, 陈 阳, 崔 佳, 等. 支管在轴向荷载作用下 Q460C 高强钢 T 型圆管节点疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 57-63, 124.
CHENG Rui, CHEN Yang, CUI Jia, et al. Experimental Study on Fatigue Behavior of Q460C High Strength Steel Welded Tubular T-joints Under Axial Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 57-63, 124.
- [102] TONG L W, XU G W, YAN D Q, et al. Fatigue Tests and Design of Diamond Bird-beak SHS T-joints Under Axial Loading in Brace[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 118: 49-59.
- [103] 刘永健, 张 宁, 张俊光. PBL 加劲型矩形钢管混凝土的力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(4): 13-17.
LIU Yong-jian, ZHANG Ning, ZHANG Jun-guang. Mechanical Behavior of Concrete-filled Square Steel Tube Stiffened with PBL[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(4): 13-17.
- [104] 童乐为, 王 柯, 史炜洲, 等. 圆管混凝土 T 型焊接节点热点应力试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(3): 329-334.
TONG Lei-wei, WANG Ke, SHI Wei-zhou, et al. Experimental Study on Hot Spot Stress of Welded Concrete Filled CHS T-joints[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(3): 329-334.
- [105] WANG K, TONG L W, ZHU J, et al. Fatigue Behavior of Welded T-joints with a CHS Brace and CFCHS Chord Under Axial Loading in the Brace[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(2): 142-152.
- [106] GU M, TONG L W, ZHAO X L, et al. Numerical Analysis of Fatigue Behavior of Welded CFCHS T-joints[J]. Advanced Steel Construction, 2014, 10(4): 476-497.
- [107] 刁 砚, 范文理. 钢管混凝土管节点疲劳试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(5): 45-47, 17.
DIAO Yan, FAN Wen-li. Experimental Research on Fatigue of Tubular Joints in Concrete-filled Steel Tube[J]. Building Structure, 2013, 43(5): 45-47, 17.
- [108] KIM I G, CHUNG C H, SHIM C S, et al. Stress Concentration Factors of N-joints of Concrete-filled Tubes Subjected to Axial Loads[J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14(1): 1-11.
- [109] DROOGNE D. The Influence of Concrete Filling on the Fatigue Behaviour of Tubular Steel Bridge Joints [D]. Ghent: Ghent University, 2015.
- [110] JARDINE B. Fatigue Life Enhancement of Tubular Joints by Grout Injection[R]. Glasgow: Health and Safety Executive, 1993.
- [111] LIU Y J, XIONG Z H, FENG Y C, et al. Concrete-filled Rectangular Hollow Section X Joint with Perfbond Leicester Rib Structural Performance Study: Ultimate and Fatigue Experimental Investigation[J]. Steel and Composite Structures, 2017, 24(4): 455-465.
- [112] 李鸿升. 矩形钢管混凝土 X 型焊接节点疲劳性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
LI Hong-sheng. The Fatigue Behavior of Welded Rectangular Concrete-filled Steel Tubular X-joints [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [113] GANDHI P, BERGE S. Fatigue Behavior of T-joints: Square Chords and Circular Braces [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(4): 399-404.
- [114] BIAN L C, LIM J K, KIM Y J. Fatigue Strength and Fracture Behaviour of CHS-to-RHS T-joints Subjected to Out-of-plane Bending[J]. KSME International Journal, 2003, 17(2): 207-214.
- [115] BIAN L C, LIM J K. Fatigue Strength and Stress Concentration Factors of CHS-to-RHS T-joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(5): 627-640.
- [116] MASHIRI F R, ZHAO X L, GRUNDY P. Stress Concentration Factors and Fatigue Behaviour of Welded Thin-walled CHS-SHS T-joints Under In-plane Bending[J]. Engineering Structures, 2004, 26(13): 1861-1875.
- [117] PACKER J A, MASHIRI F R, ZHAO X L, et al. Static and Fatigue Design of CHS-to-RHS Welded Connections Using a Branch Conversion Method[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(1): 82-95.
- [118] TONG L W, FU Y G, LIU Y Q, et al. Stress Concentration Factors of Diamond Bird-beak SHS T-joints Under Brace Loading [J]. Thin-walled Structures, 2014, 74: 201-212.
- [119] TONG L W, XU G W, LIU Y Q, et al. Finite Element Analysis and Formulae for Stress Concentration Factors of Diamond Bird-beak SHS T-joints [J]. Thin-walled Structures, 2015, 86: 108-120.
- [120] 程 斌, 钱 沁. 方型鸟嘴式 T 形方管节点的应力集中特性研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(5): 1-10.
CHENG Bin, QIAN Qin. Study on Stress Concentration Characteristics of Square Bird-beak Square-hollow-section T-joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(5): 1-10.