

文章编号:1673-2049(2016)01-0067-09

钢结构节点断裂的研究现状

廖芳芳¹, 王伟², 李文超¹, 周天华¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:对钢框架梁柱节点及钢管节点断裂的研究现状进行了综述,指出现有研究多是基于传统断裂力学方法采用应力强度因子、裂纹尖端张开位移(CTOD)或J积分等预测断裂,这种方法主要适用于研究脆性断裂或局部塑性损伤程度极其有限的伪脆性断裂问题,而对强震作用下构造无明显缺陷部位发生较大尺度屈服时的延性断裂问题并不适用;介绍了近年来发展的基于微观机制的断裂预测方法,可以考虑节点区显著的应力三轴度因素,且适用于无初始裂纹或处于明显塑性阶段的节点延性断裂预测问题,可用于预测强震作用下钢结构焊接节点的超低周疲劳断裂。

关键词:钢框架梁柱节点;钢管节点;断裂;研究现状;微观机制模型;强震

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A

Review on Research Status of Connection Fracture of Steel Structures

LIAO Fang-fang¹, WANG Wei², LI Wen-chao¹, ZHOU Tian-hua¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Research status of the fractures of beam-to-column connections of steel frame and steel tube connections were reviewed. Based on traditional fracture mechanics method, it was indicated that the existing researches mostly predicted fracture by using the stress intensity factor, crack tip opening displacement (CTOD) or J-integral, etc. The method was mainly fit for the research on brittle fracture or pseudo brittle fracture with limited local plastic damage. While it was not fit for the ductile fracture prediction of the parts with large-scale yielding region and no initial flaw under strong earthquakes. Therefore, the fracture prediction method based on micromechanics developed in recent years was also introduced. It considered the stress triaxiality in the joint area and was fit for the ductile fracture prediction of the joint with no initial flaw or in obvious plastic phase. It can be used to predict extremely low cycle fatigue fracture of welded connections of steel structures under strong earthquakes.

Key words: beam-to-column connection of steel frame; steel tube connection; fracture; research status; micromechanical model; strong earthquake

0 引言

断裂是建筑结构的一种重要失效模式,由连接

节点断裂失效导致结构整体发生倒塌的事故近年来时有发生,这些事故不仅造成人员伤亡,而且给社会带来巨大的经济损失,引起了工程界的高度关注,如

收稿日期:2015-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51408055,51378380);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310828151070);

陕西省博士后科研项目

作者简介:廖芳芳(1983-),女,湖南怀化人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:fangfangliao@chd.edu.cn。

2004 年巴黎戴高乐机场候机厅顶棚发生倒塌^[1]。法国交通部调查后发现引起这一事故的导火索为候机厅顶棚与钢结构支柱连接处的突发性断裂。在 1994 年的美国 Northridge 地震和 1995 年的日本 Kobe 地震中,大量钢结构房屋发生倒塌破坏。震后调查表明,这些框架结构的梁柱节点及其周围普遍存在断裂现象^[2]。这些大型钢结构的断裂事故充分表明,对于连接节点断裂行为机理的研究和工程断裂判定准则的建立已成为目前亟待解决的课题。本文基于这一背景,主要介绍钢结构节点断裂的研究现状及存在的问题。

1 钢结构节点断裂行为的研究现状

1.1 钢框架梁柱节点断裂行为的研究现状

目前关于节点断裂的研究主要集中在钢框架梁柱节点的断裂行为研究。以往的梁柱节点试件多数为 H 型梁-H 形柱翼缘焊接腹板螺栓连接节点。日本在 20 世纪 70 年代以前采用的也是这种结构形式,因而以武藤清教授为主做了许多这种形式的足尺试验。结果表明,焊接质量较好的试件有足够的非弹性变形能力,而焊接缺陷引起的刻痕效应足以使重型 H 型试件在常温下发生脆性断裂。20 世纪 70 年代中期以后,日本开始改用 H 型梁-箱型柱结构形式,同时构件尺寸不断增大,施工工艺也有所变化,但由于足尺试验的诸多困难,使得基于足尺模型的断裂试验难以实现^[3]。

在过去的 30 多年里,以 Popov 为代表的美国学者陆续进行了大批的梁柱节点在低周反复荷载作用下的试验研究,试验中的脆性断裂现象比例相当高。在 20 世纪 80 年代早期,为给某 47 层建筑抗弯钢框架的设计提供依据,Bertero 等针对该抗弯钢框架节点板域大、高轴压力和有倾覆弯矩等特点设计了 7 个试件^[4]。由于试验设备所限,试件取原型的一半大小。大部分试件在焊缝处或在焊缝热影响区处发生了脆性破坏,破坏时板域无明显塑性变形。后来 Tsai 等^[5]设计了 10 个翼缘焊接、腹板螺栓连接的梁-宽翼缘柱连接试件,在悬臂梁端部施加递增的循环位移,研究的主要参数包括梁翼缘与整个梁截面塑性截面模量之比、腹板附加螺栓、腹板附加焊缝及柱板域强度。试验结果表明:该节点在反复荷载作用下的塑性转动能力在 $0.009 \sim 0.018$ rad 范围内,并与梁翼缘与整个梁截面塑性截面模量之比没有明显关系;梁翼缘的抗弯强度能较准确地预测该节点的极限抗弯承载力;腹板附加焊缝能显著提

高该节点的强度、延性和能量吸收能力,而腹板附加螺栓却不能。

1994 年美国 Northridge 地震和 1995 年日本 Kobe 地震中,钢框架结构出现了大量脆性断裂现象^[6],引起工程界的广泛关注。由美国加州结构工程师协会、应用技术委员会和从事地震工程研究的加州大学三方组成的联合体(SAC Joint Venture)率先启动了通过试验研究、理论分析和有限元模拟技术考察钢框架梁柱节点失效行为的研究项目^[7],其中大部分试验为动力或静力荷载下的足尺连接试验^[8-10],理论研究则主要与钢框架体系的整体行为有关,以考察节点断裂对结构整体行为的影响效应,并研究该分析方法对预测损伤程度和断裂位置的实用性^[8,11-13]。有限元模拟主要是对试验结果进行校验,在此基础上提取节点关键部位的应力、应变参数进行传统断裂力学指标的参数计算^[14]。Kaufmann 等^[15]研究了破坏节点断裂表面及试验试件的焊接缺陷,发现在柱的焊缝表面存在不同尺寸的裂纹缺陷(图 1),对断口的显微检测分析表明断裂时节点没有显著的塑性变形,以至于 Northridge 地震的破坏多数是不可预测和解释的。Joh 等^[16]用线弹性断裂力学方法对翼缘焊接、腹板螺栓连接节点的断裂强度进行了研究,提出了一种用破坏时裂缝前端的最大能量释放率计算节点脆性断裂强度的新方法。基于该建议方法,他们用 1 个焊缝缺陷分布和屈服应力分布样本研究了节点脆性断裂的可能性。Schafer 等^[17]指出应力三轴度对钢框架梁柱节点的断裂有很大影响,应力三轴度越大,发生断裂的可能性就越大。

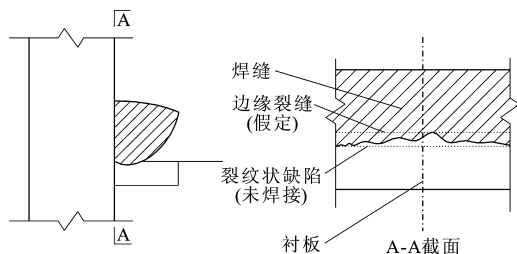


图 1 柱焊缝表面的典型裂纹状缺陷和假定的边缘裂缝
Fig. 1 Typical Crack-like Defect and Assumed Edge Crack at Column Weld Interface

日本也同期开展了这方面的研究^[18-19],Azuma 等^[20]进行了 4 个带焊接缺陷的梁柱节点在反复荷载作用下的足尺试验和非线性有限元分析,以评定焊接缺陷对梁柱节点的重要影响。结果表明,用角焊缝加强部分焊透的坡口焊未融透区域能使焊接节

点有足够的横截面,延性裂纹稳定扩展,从而使节点有足够的变形能力,而焊根处带焊接缺陷的节点延性裂纹扩展迅速,最后发生脆性断裂破坏。以 Kuwamura 为代表的研究人员直接从梁柱连接的不同部位多点取样,进行拉伸试验、硬度试验和夏比冲击试验,从断裂前后材质的变化推断断裂破坏的发展过程。他们提出了一种基于性能的防止 Kobe 地震中观察到的钢框架梁柱节点脆性断裂的方法,根据脆性断裂前梁的塑性变形能力,将结构钢和焊缝的质量分别分为 4 个等级(母材主要考虑屈强比和夏比冲击韧性,焊缝主要考虑焊接时的热量输入和节点构造),并用 Kobe 地震后 125 个试件的足尺试验和分析数据验证了这种基于性能的母材和焊缝的分级。在实际应用中,为综合考虑母材和焊缝的等级,用延性指标来计算钢框架的塑性强度^[21-22]。同时他们还进行了构件与节点的足尺低温动载试验,采用电子显微技术进行断口特征分析,考察断裂发生和成长的轨迹^[23]。

中国学者早期主要从梁柱节点的低周反复拟静力加载试验入手,辅以三维弹塑性有限元分析,采用塑性应变指标或传统断裂力学指标探讨节点的断裂机理^[24-25]。后又逐渐发展到采用裂纹尖端张开位移(CTOD)指标作为断裂判据进行钢结构构件抗低温脆断设计方法的研究以及基于损伤累积理论对钢结构断裂破坏行为的分析^[26-27]。李国强等^[2]介绍了 Northridge 地震和 Kobe 地震中钢框架梁柱焊接节点的断裂破坏模式,结合 H 形梁-H 形柱节点低周反复荷载试验的断裂现象,指出梁柱焊接连接脆性断裂对节点承载力影响极大,而脆性断裂的原因主要有焊接缺陷、构造不合理及设计方案欠妥等,以降低梁柱焊接连接缺陷敏感度为目标探讨了预防脆性断裂的措施。姚国春等^[28-30]对地震中钢框架梁柱节点脆性断裂的原因和预防措施进行了研究。陈以一等^[31]对钢框架节点在强烈地震或极端荷载情况下因突然断裂引起的冲击作用进行了试验研究,验证了采用具有高频采样能力的测试设备准确测取断裂过程中结构反应的可行性,揭示了节点瞬间断裂仍然包含渐进性和局部性 2 个特点。刘永明等^[32-33]采用杆端非线性弹簧模型对钢框架梁柱节点在地震作用下的断裂破坏模式进行数值模拟,对结构钢(Q235C, Q345C)焊接热影响区断裂性能进行了试验研究,获得了 2 种材料在焊接热影响区的 J_R 阻力曲线,通过比较不同的断裂准则,考虑了裂纹失稳扩展前的稳态裂纹累积,根据 J 积分撕裂模量法建立

了裂纹失稳的失效评定图,设定了模型参数,并验证建立的模型及算法可充分反映局部断裂后节点滞回性能的主要特点,归纳出适用于整体结构分析的考虑节点局部断裂的非线性弹簧模型。王元清等^[34]以 I 型裂纹尖端应力强度因子和 J 积分为定量评价指标,分析了焊接孔形式、初始缺陷尺寸及位置、焊接垫板、角焊缝补强等设计细节对节点材料断裂韧性需求的影响。石永久等^[35]研究了不同构造形式对钢框架焊接节点抗震性能的影响以及构造形式对节点地震作用下的反应和破坏形态的改变作用。

总体来看,现有钢框架梁柱节点断裂的研究成果已较多,主要体现在:①通过梁柱焊接节点的足尺模型试验识别导致连接早期断裂的因素,包括高应变速率、构件内部缺陷、现场焊接缺陷和低韧性钢材的使用等;②发展了基于线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学的数值仿真技术,先后提出了与能量释放率准则和应力强度因子准则等有关的脆性断裂分析方法;③设计了有助于提高钢框架梁柱节点断裂韧性的构造改进措施,如减小梁底翼缘处截面宽度,梁底翼缘处设置腋板,梁端上下翼缘设置螺栓托座、翼缘盖板及采用“狗骨”截面梁等,并对其改进效果进行了试验评价;④初步建立了能够反映连接断裂和此后强度与刚度损失的节点数值模型,并应用于焊接钢框架的地震反应分析。然而节点断裂仍有许多要继续研究的课题:①对造成节点断裂的各种因素的深入研究,从机理上对节点断裂进行分析;②节点断裂部位的预测分析;③建立在钢结构构件层面上的断裂分析数值模拟,包括模型的建立,断裂临界条件的确定,断裂后的平衡,断裂后的路径,不连续位移场的处理;④断裂后结构整体性能的研究等。

1.2 钢管节点断裂行为的研究现状

与一般框架建筑结构相比,大跨公共建筑的重要性和影响程度不言而喻。钢管结构是近年来大跨公共建筑广泛采用的结构形式。随着中国城镇化建设的迅猛发展和北京 2008 年奥运会、上海 2010 年世博会的召开,中国钢管结构得到前所未有的发展和应用。该类结构最常采用钢管直接焊接节点的抗断裂性能对整体结构的安全性至关重要,应得到研究人员的足够重视。根据各国钢管节点承载力研究的相关报道,实际工程或试验中时常发生节点延性断裂破坏模式。这一方面与钢管节点相贯线区域处于复杂应力状态有关,几何外形的突变较易引发应力集中,不能用简单的单向应力状态来预测断裂,因此目前尚缺乏准确有效的节点断裂强度验算公式;

另一方面也与钢管节点的构造特点有关,即由于相贯部位腹杆钢管内难以安放内衬,焊缝根部的全熔透要求经常无法达到,从而形成构造缺陷。这种缺陷是否会导致节点在地震作用下提前开裂从而降低承载能力需要加以专题研究。

目前各国对钢管节点的研究大多集中于静力承载性能和非刚性变形性能问题的探讨,而对于主管与支管焊接部位断裂的研究相对较少。Cofer 等^[36]和 Wang 等^[37]基于连续损伤力学(CDM)对 T 型、K 型和 KK 型管节点的宏观裂纹开展进行了试验和有限元分析,建立了一个可以较好预测管节点宏观裂纹开展的损伤准则。Gurson 模型能模拟带微空穴的材料塑性屈服特性,Qian 等^[38]采用 Gurson 模型研究了 2 种加载情况下的圆钢管节点,在轴向拉伸时空穴扩张和聚合的效果比剪切时更明显,同时研究了带初始裂纹和不带初始裂纹 2 种类型的管节点,延性断裂引起材料软化,导致荷载-位移曲线下落,这与试验结果一致。由于缺乏材料数据,他们还对 Gurson 材料特性进行了敏感性研究。Lie 等^[39-40]对带初始裂纹的方钢管焊接 T 型节点进行了一系列足尺静力强度试验和精确数值模拟。试验中在支管端部对节点施加轴力,用势能下降技术监测裂纹扩展,并用线性变化位移传感器记录裂纹尖端张开位移。试验在室温下进行,因此材料处于延性-脆性转变曲线的上界,发生延性破坏。所有试验都在较小的区域发生稳定的延性撕裂。基于屈服线理论计算了塑性破坏荷载,并用于 BS 7910 的失效评定图(FAD),其足以提供评定带裂纹的方钢管截面 T 型节点的破坏过程。部分 T 型节点精确数值模型计算的极限荷载与试验结果吻合较好,证明了该数值模型的可行性,在此基础上,用这个模型研究了不同几何尺寸的节点并与屈服线理论的计算结果进行了比较,结果表明,支管与主管宽度比 $\beta < 0.8$ 时用屈服线理论能较准确地预测节点的塑性破坏荷载。Bjork 等^[41]对冷弯型钢矩形空钢管截面制作的焊接 K 型足尺节点的变形、极限承载力和断裂特性进行了试验和数值分析。在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,焊接 K 型节点的主要破坏模式为主管翼缘在支主管连接受拉焊缝焊趾处的延性撕裂。在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行的试验中,初始延性裂纹导致脆性断裂。对 1 个 K 型节点的扩展裂纹进行了基于有限元的 J 积分评定,并与 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测得的材料曲线相结合,评定结果表明,裂纹一旦出现就会在几乎恒定的荷载下不断扩展。有限元模型中假定的初始裂纹形

状和尺寸偏保守,用它预测的节点极限承载力和延性比试验结果偏保守。这个过程能在低温情况下较好地评定钢管节点的极限延性。

1.3 钢结构节点断裂行为研究的不足

综上所述,既有节点断裂研究存在较大的局限性,包括:①研究对象方面,研究重点主要集中在钢框架梁柱节点的脆性断裂,对其他类型的节点(如大跨度公共建筑中常用的钢管焊接节点)研究较少;②研究方法方面,基本均采用传统的断裂力学分析方法(如应力强度因子、裂纹尖端张开位移和 J 积分等),由于它们均假定裂纹或缺陷已经存在,且在初始裂纹尖端存在高应变约束,因此主要适用于研究脆性断裂或局部塑性损伤程度极其有限的伪脆性断裂问题^[42],而对强震作用下构造无明显缺陷部位发生较大尺度屈服(裂纹尖端钝化)时的延性断裂问题并不适用^[43],此外由于传统断裂力学未考虑应力三轴度因素,也无法适用于以三向应力状态为主的节点断裂问题;③研究内容方面,主要偏重于构造措施对梁柱节点脆性断裂性能的影响分析,尚缺乏对焊接过程中无法避免的缺陷及其残余应力等因素的细致探讨;④研究成果方面,以断裂原因分析和设计改进建议的提出为多,尚未形成明确的可供工程应用的节点断裂预测准则。

2 基于微观机制的模型在钢结构节点断裂预测中的应用

从广义上来说,钢结构在地震作用下的断裂属于低周疲劳问题,通常指延性金属材料在经历了低于 10 000 次的周期性塑性应变幅循环作用后发生的断裂破坏^[44]。近年来,很多学者在对低周疲劳破坏过程和机理进行研究的基础上进一步细分^[45]后指出,严格意义上的低周疲劳是指中等应变幅循环作用 100~10 000 次引起的疲劳破坏,破坏性质为脆性断裂或局部塑性损伤程度极其有限的伪脆性断裂^[46](特指发生塑性变形后向脆性破坏转变的断裂)。对于构造无明显缺陷的钢结构而言,其在强震作用下主要通过非弹性往复大变形耗散地震能量,这样就使得局部大多经历了极大的循环应变幅(常达到钢材屈服应变的数倍以上)并在很少的循环次数后发生断裂。该类疲劳问题的本质与上述严格意义上的低周疲劳问题不同,属于一类新型的疲劳问题,称为超低周疲劳(Extremely Low Cycle Fatigue,ELCF),是指结构在大应变幅往复作用下发生大尺度屈服并经历几十次甚至 10 次以内的荷载

循环即发生断裂,其破坏性质属于典型的延性断裂^[45-47],这种类型的断裂大体有空穴形核、扩张和聚合几个过程,如图 2 所示^[48]。传统断裂力学方法因其局限性并不适用于预测超低周疲劳断裂。

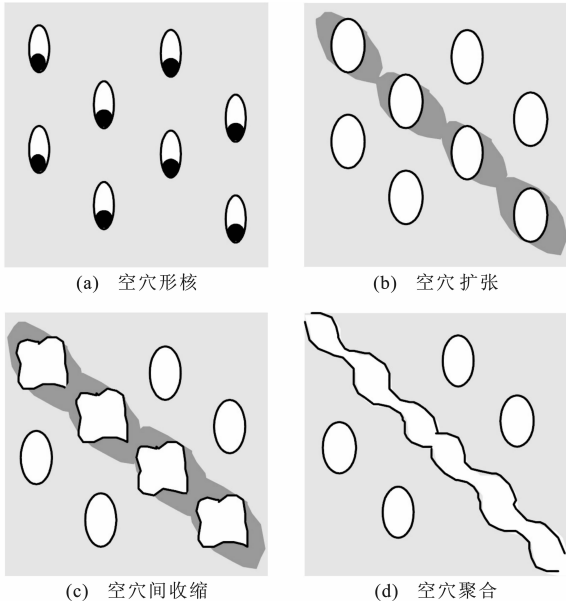


图 2 空穴形核、扩张和聚合机理

Fig. 2 Mechanisms of Void Nucleation, Growth and Coalescence

表 1 单调加载和反复加载的微观机制模型

Tab. 1 Micromechanical Models of Monotonic and Cyclic Loadings

模型特点	单调加载模型	反复加载模型
假定应力三轴度不变	$\epsilon_p - \alpha \exp(-1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_e}) > 0$ (SMCS)	$\epsilon_{critical} = \exp(-\lambda_{DSPS} \epsilon_p) \epsilon_p^{critical}$ (DSPS)
考虑应力三轴度变化	$\int_0^{\epsilon_p^{critical}} \exp(1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_e}) d\epsilon_p - \eta > 0$ (VGM)	$\exp(-\lambda_{CVGM} \epsilon_p) \eta_m = \sum_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \exp(1.5 T) d\epsilon_1 - \sum_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \exp(1.5 T) d\epsilon_c$ (CVGM)

注: ϵ_p 为等效塑性应变; σ_m 为静水应力; σ_e 为等效应力或 Mises 应力; $\epsilon_{critical}$ 为反复加载情况下累积拉应变与压应变差值的临界值; $\epsilon_p^{critical}$ 为单调加载情况下的临界等效塑性应变; η_m 为材料在单调荷载作用下表示临界空穴扩张比的材料参数; ϵ_1, ϵ_2 分别为荷载循环开始和结束时的应变; T 为应力三轴度, $T = \sigma_m / \sigma_e$; ϵ_1, ϵ_c 分别为拉应变和压应变。

和 VGM 模型能准确预测钢结构节点在单调荷载作用下的延性断裂。Chi 等^[54]以 SMCS 模型为断裂判据,通过有限元分析将钢框架梁柱焊接节点的断裂行为与焊接件拉板试验的断裂行为联系起来,为 SMCS 判据在延性断裂预测中的应用提供了例证。随后 Kanvinde 等^[55]又进行了 24 个用角焊缝连接的十字形试件的单向拉伸试验(图 3),分别用传统断裂力学 J 积分方法和基于微观机制的 SMCS 模型预测了试件的断裂变形,结果表明,相对于 J 积分方法,SMCS 模型能较准确地预测结构角焊缝的断裂变形,而 J 积分方法偏保守,尤其对于韧性较大的角焊缝材料,在断裂前大范围屈服,J 积分结果与试验

与传统断裂力学方法相比,基于材料塑性损伤机制的微观机制模型能描述应力-应变场对材料内在微观结构特性的影响,从而能够作为具有明确物理意义的判据,实现对钢结构节点延性裂纹开展更为准确的预测^[45]。适用于单调荷载作用下断裂预测的微观机制模型有 Hancock 等^[49]提出的应力修正临界应变模型(Stress Modified Critical Strain Model, SMCS)以及 Rice 等^[50]提出的空穴扩张模型(Void Growth Model, VGM)。适用于超低周疲劳断裂预测的微观机制模型有 Kanvinde^[48]提出的退化有效塑性应变模型(Degraded Significant Plastic Strain Model, DSPS)和循环空穴扩张模型(Cyclic Void Growth Model, CVGM)。单调加载和反复加载的微观机制模型见表 1。

单调加载的微观机制模型包括模型方程中的断裂韧性参数 α (SMCS) 或 η (VGM) 和特征长度参数,微观机制断裂破坏准则必须在特征长度上得到满足才能引发断裂。反复加载的微观机制模型还包括损伤退化参数 λ_{DSPS} 和 λ_{CVGM} ,用以反映反复加载对材料断裂韧性的降低。

Kanvinde 等^[51-53]通过对螺栓节点和“狗骨”节点进行 12 个拉板试验和有限元分析,验证了 SMCS

结果差别较大,更显示出 SMCS 模型预测结果的准确性。Wang 等^[56]进行了 7 个钢框架梁柱节点子结构单向受拉试验,用 J 积分方法及 VGM 和 SMCS 模型对每个试件进行了断裂预测,与试验结果相比, J 积分预测结果较保守,而 VGM 和 SMCS 模型预测结果较准确。Kanvinde 等^[57-58]通过对 14 个开较钝槽口的试件和 4 个“狗骨”试件进行试验和有限元分析,验证了 DSPS 和 CVGM 模型预测钢结构超低周疲劳断裂的准确性。Fell 等^[59]将基于微观机制的模型用于中心支撑框架系统的足尺钢支撑构件超低周疲劳断裂的预测。随后进行的 6 个足尺柱脚节点在反复荷载作用下的试验结果证明了 CVGM 模

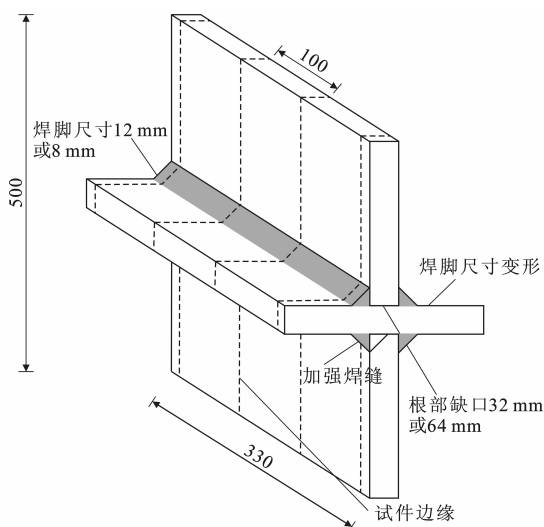


图3 角焊缝连接的十字形试件示意(单位:mm)

Fig. 3 Schematic Illustration of Cruciform Specimen Connected by Fillet Weld (Unit:mm)

型预测实际钢结构节点断裂的能力^[60]。Zhou 等^[61]用 CVGM 模型对 9 个足尺梁柱节点超低周疲劳断裂进行了预测,预测结果与试验结果吻合较好。Liao 等^[62-63]校准了 Q345 钢母材、熔敷金属和热影响区 3 种材料的微观机制模型参数,进行了足尺钢结构梁柱焊接节点试件在超低周疲劳下的试验,用校准的微观机制模型对钢结构焊接节点在单调荷载作用下和超低周疲劳下的试验进行了断裂预测,得到了较好的预测结果,用自编的 ABAQUS 子程序 VUMAT,以微观机制模型为断裂判据,模拟了钢结构焊接节点在单调荷载作用下的裂后路径。

现有研究成果验证了微观机制模型用于预测实际钢结构母材、钢支撑和焊接节点延性断裂的适用性,以及在有限元分析中引入微观机制断裂判据可得到钢结构焊接节点在单调荷载作用下的裂后路径,但仍存在以下尚未解决的问题:①目前中国常用的除 Q345 钢以外其他牌号钢材的微观机制模型参数尚未校准,微观机制模型参数的敏感性分析及不同批次钢材参数的稳定性分析尚未进行,影响参数的主要因素尚未确定;②超低周往复荷载作用下钢结构焊接节点裂后路径的数值分析和适用单元尚未解决;③对造成节点超低周疲劳断裂的各种因素尚未进行深入研究,尚未从机理上分析节点的超低周疲劳断裂并提出控制地震作用下节点延性断裂的设计对策。

3 结 语

目前关于节点断裂的研究多集中于钢框架梁柱

节点的断裂,对钢管节点断裂的研究较少,而且多采用传统的断裂力学方法,如应力强度因子、裂纹尖端张开位移或 J 积分等,它们是基于高应变约束或小范围屈服假定建立的,主要适用于研究脆性断裂或局部塑性损伤程度极其有限的伪脆性断裂问题,而对强震作用下构造无明显缺陷部位发生较大尺度屈服时的延性断裂问题并不适用。近来发展的基于微观机制的断裂预测方法可以考虑节点区显著的应力三轴度因素,并且适用于无初始裂纹或处于明显塑性阶段的节点延性断裂预测,但目前其应用也极其有限。钢结构焊接节点在强震下的断裂失效一般是在几十次甚至 10 次以内的荷载循环次数下经历反复非弹性变形后在焊缝熔敷金属或热影响区处发生,属于延性断裂与超低周疲劳的交互作用,因此今后的研究有必要将微观机制模型引入钢结构焊接节点的超低周疲劳断裂预测分析。

参考文献:

References:

- [1] 吴德飞. 钢结构损伤累积至断裂及损伤负向激励的长期效应[D]. 杭州:浙江大学,2007.
WU De-fei. Steel Structure Damage Accumulated to Fracture and the Long Term Effect of Damage Passive Encouragement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [2] 李国强,孙飞飞,沈祖炎. 强震下钢框架梁柱焊接连接的断裂行为[J]. 建筑结构学报,1998,19(4):19-28.
LI Guo-qiang, SUN Fei-fei, SHEN Zu-yan. Fracture Behavior of Welded Beam-to-column Connections of Steel Moment Frames Under Severe Earthquakes[J]. Journal of Building Structures, 1998, 19(4): 19-28.
- [3] AKIYAMA H, YAMADA S. Damage of Steel Buildings in the Hyogoken-Nanbu Earthquake[C]//Tongji University. Proceedings of EASEC5. Shanghai: Tongji University Press, 1995: 2463-2474.
- [4] BERTERO V V, ANDERSON J C, KRAWINKLER H. Performance of Steel Buildings Structures During the Northridge Earthquake[R]. Berkeley: University of California, 1994.
- [5] TSAI K C, WU S, POPOV E P. Experimental Performance of Seismic Steel Beam-column Moment Joints[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(6): 925-931.
- [6] POPOV E P, YANG T S, CHANG S P. Design of Steel MRF Connections Before and After 1994 Northridge Earthquake[J]. Engineering Structures, 1998, 20(12): 1030-1038.

- [7] SAC Joint Venture. Interim Guidelines: Evaluation, Repair, Modification and Design of Welded Steel Moment Frame Structures[R]. Sacramento: SAC Joint Venture, 1995.
- [8] ANDERSON J C, GOURLEY B C, GREEN M, et al. Case Studies of Steel Moment Frame Building Performance in the Northridge Earthquake of January 17, 1994[R]. Sacramento: SAC Joint Venture, 1995.
- [9] SAC Joint Venture. Experimental Investigations of Beam-column Subassemblages[R]. Sacramento: SAC Joint Venture, 1996.
- [10] JONES S L, FRY G T, ENGELHARDT M D. Experimental Evaluation of Cyclically Loaded Reduced Beam Section Moment Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 441-451.
- [11] SAC Joint Venture. Analytical and Field Investigations of Buildings Affected by the Northridge Earthquake of January 17, 1994[R]. Sacramento: SAC Joint Venture, 1995.
- [12] SAC Joint Venture. Parametric Analytic Investigation of Ground Motion and Structural Response, Northridge Earthquake of January 17, 1994[R]. Sacramento: SAC Joint Venture, 1995.
- [13] GROSS J L. A Connection Model for the Seismic Analysis of Welded Steel Moment Frames[J]. Engineering Structures, 1998, 20(4/5/6): 390-397.
- [14] CHI W M, DEIERLEIN G G, INGRAFFEA A R. Fracture Toughness Demands in Welded Beam-column Moment Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(1): 88-97.
- [15] KAUFMANN E J, FISHER J W. Fracture Analysis of Failed Moment Frame Weld Joints Produced in Full-scale Laboratory Tests and Buildings Damaged in the Northridge Earthquake[R]. Sacramento: SAC Joint Venture, 1995.
- [16] JOH C, CHEN W F. Fracture Strength of Welded Flange-bolted Web Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(5): 565-571.
- [17] SCHAFER B W, OJDROVIC R P, ZARGHAMEE M S. Triaxiality and Fracture of Steel Moment Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(10): 1131-1139.
- [18] DALE K, KUROBANE Y, AZUMA K, et al. Brittle Fracture in Beam-to-column Welded Joints-numerical Simulation of Test Results[C]//International Society of Offshore and Polar Engineers. Proceedings of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003: 1-8.
- [19] IWASHITA T, KUROBANE Y, AZUMA K, et al. Prediction of Brittle Fracture Initiating at Ends of CJP Groove Welded Joints with Defects; Study into Applicability of Failure Assessment Diagram Approach[J]. Engineering Structures, 2003, 25(14): 1815-1826.
- [20] AZUMA K, KUROBANE Y, MAKINO Y. Cyclic Testing of Beam-to-column Connections with Weld Defects and Assessment of Safety of Numerically Modeled Connections from Brittle Fracture[J]. Engineering Structures, 2000, 22(12): 1596-1608.
- [21] KUWAMURA H, IYAMA J, MATSUI K. Effects of Material Toughness and Plate Thickness on Brittle Fracture of Steel Members[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(11): 1475-1483.
- [22] KUWAMURA H. Classification of Material and Welding in Fracture Consideration of Seismic Steel Frames[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 547-563.
- [23] KUWAMURA H. Fracture of Steel During an Earthquake-state-of-art in Japan[J]. Engineering Structures, 1998, 20(4/5/6): 310-322.
- [24] 郭秉山, 顾强, 李养成. 钢框架梁柱腹板连接梁翼缘对接焊缝的破坏机理[J]. 西安科技大学学报, 2004, 24(4): 417-421.
- GUO Bing-shan, GU Qiang, LI Yang-cheng. Fracture Mechanism of Butt Welding in Beam-column Web Connections of Steel Moment Frames[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2004, 24(4): 417-421.
- [25] 杨勇, 李婷, 章梓茂, 等. 高层钢结构标准梁柱节点脆性断裂机理研究[J]. 钢结构, 2006, 21(6): 13-17.
- YANG Yong, LI Ting, ZHANG Zi-mao, et al. Research on Brittle Fracture Mechanism of Steel Frame Connection of Tall Buildings[J]. Steel Construction, 2006, 21(6): 13-17.
- [26] 王元清, 武延民, 石永久, 等. 钢结构构件抗断裂分析理论与实用方法研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(1): 11-15.
- WANG Yuan-qing, WU Yan-min, SHI Yong-jiu, et al. Research on the Theory and Design Method for the Fracture Resistance of Steel Components[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(1): 11-15.
- [27] 沈祖炎, 沈苏. 高层钢结构考虑损伤累积及裂纹效应的抗震分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002, 30(4): 393-398.

- SHEN Zu-yan, SHEN Su. Seismic Analysis of Tall Steel Structures with Damage Cumulation and Fracture Effects[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(4): 393-398.
- [28] 姚国春, 霍立兴, 张玉凤, 等. 焊接钢结构梁柱节点地震下的断裂行为研究[J]. 钢结构, 2000, 15(4): 25-27.
- YAO Guo-chun, HUO Li-xing, ZHANG Yu-feng, et al. Investigation on Fracture Behavior of Welded Steel Structure Beam-column Connections Under Earthquakes[J]. Steel Construction, 2000, 15(4): 25-27.
- [29] 姚国春, 霍立兴, 张玉凤, 等. 带人工裂纹的焊接钢结构梁柱节点有限元应力分析[J]. 机械强度, 2001, 23(1): 47-49.
- YAO Guo-chun, HUO Li-xing, ZHANG Yu-feng, et al. Finite Element Stress Analysis of Welded Steel Structure Beam-to-column Connection with Artificial Crack[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(1): 47-49.
- [30] 陈生金. 高韧性钢骨梁柱接头[J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(5): 18-25.
- CHEN Sheng-jin. Ductile Steel Beam-to-column Connection[J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(5): 18-25.
- [31] 陈以一, 卞若宁. 钢框架节点局部断裂冲击作用实验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 299-303, 314.
- CHEN Yi-yi, BIAN Ruo-ning. Tests on the Impact Effect of Partial Fracture at Steel Frame Connections[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(3): 299-303, 314.
- [32] 刘永明, 张晔江, 陈以一, 等. 焊接热影响区断裂性能试验研究[J]. 力学季刊, 2002, 23(2): 157-163.
- LIU Yong-ming, ZHANG Ye-jiang, CHEN Yi-yi, et al. Experimental Research on Fracture Performance in Weld Heat-affect Zone[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2002, 23(2): 157-163.
- [33] 刘永明, 陈以一, 陈扬骥. 考虑钢框架节点局部断裂的滞回模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(5): 525-529.
- LIU Yong-ming, CHEN Yi-yi, CHEN Yang-ji. Hysterical Model of Steel Frame Connection Considering Partial Fracture[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(5): 525-529.
- [34] 王元清, 周 晖, 石永久, 等. 基于断裂力学的钢框架梁柱节点抗震性能分析[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 104-112.
- WANG Yuan-qing, ZHOU Hui, SHI Yong-jiu, et al. Seismic Behavior Analyses of Welded Beam-to-column Connections Based on Fracture Mechanics[J]. Engineering mechanics, 2012, 29(4): 104-112.
- [35] 石永久, 王 萌, 王元清. 钢框架不同构造形式焊接节点抗震性能分析[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 75-83.
- SHI Yong-jiu, WANG Meng, WANG Yuan-qing. Analysis on Seismic Behavior of Different Structural Constructions of Welded Steel Frame Connections[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 75-83.
- [36] COFER W F, JUBRAN J S. Analysis of Welded Tubular Connections Using Continuum Damage Mechanics[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(3): 828-845.
- [37] WANG B, HU N, KUROBANE Y, et al. Damage Criterion and Safety Assessment Approach to Tubular Joints[J]. Engineering Structures, 2000, 22(5): 424-434.
- [38] QIAN X D, CHOO Y S, LIEW J Y, et al. Simulation of Ductile Fracture of Circular Hollow Section Joints Using the Gurson Model[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(5): 768-780.
- [39] LIE S T, CHIEW S P, LEE C K, et al. Static Strength of Cracked Square Hollow Section T Joints Under Axial Loads. I: Experimental[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(3): 368-377.
- [40] LIE S T, LEE C K, CHIEW S P, et al. Static Strength of Cracked Square Hollow Section T Joints Under Axial Loads. II: Numerical[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(3): 378-386.
- [41] BJORK T, HEINILA S, MARQUIS G. Assessment of Subzero Fracture of Welded Tubular K-joint[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(2): 181-188.
- [42] KUWAMURA H, AKIYAMA H. Brittle Fracture Under Repeated High Stresses[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1994, 29(1/2/3): 5-19.
- [43] TATEISHI K, HANJI T, MINAMI K. A Prediction Model for Extremely Low Cycle Fatigue Strength of Structural Steel[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(5): 887-896.
- [44] COFFIN J L F. Low Cycle Fatigue — A Review[J]. Applied Materials Research, 1962, 1(3): 129-141.
- [45] XUE L. A Unified Expression for Low Cycle Fatigue and Extremely Low Cycle Fatigue and Its Implication for Monotonic Loading[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(10/11): 1691-1698.
- [46] KUWAMURA H, TAKAGI N. Similitude Law of Prefracture Hysteresis of Steel Members[J]. Journal

- of Structural Engineering, 2004, 130(5): 752-761.
- [47] NIP K H, GARDNER L, DAVIES C M, et al. Extremely Low Cycle Fatigue Tests on Structural Carbon Steel and Stainless Steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(1): 96-110.
- [48] KANVINDE A M. Micromechanical Simulation of Earthquake-induced Fracture in Steel Structures[D]. Stanford; Stanford University, 2004.
- [49] HANCOCK J W, MACKENZIE A C. On the Mechanisms of Ductile Failure in High-strength Steel Subjected to Multi-axial Stress-states[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1976, 24(2/3): 147-160.
- [50] RICE J R, TRACEY D M. On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1969, 17(3): 201-217.
- [51] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Prediction of Ductile Fracture in Steel Moment Connections During Earthquakes Using Micromechanical Fracture Models[C]//WCEE. Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver; WCEE, 2004: 297-308.
- [52] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. The Void Growth Model and the Stress Modified Critical Strain Model to Predict Ductile Fracture in Structural Steels[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(12): 1907-1918.
- [53] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Finite-element Simulation of Ductile Fracture in Reduced Section Pull-plates Using Micromechanics-based Fracture Models[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(5): 656-664.
- [54] CHI W M, KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Prediction of Ductile Fracture in Steel Connections Using SMCS Criterion[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(2): 171-181.
- [55] KANVINDE A M, FELL B V, GOMEZ I R, et al. Predicting Fracture in Structural Fillet Welds Using Traditional and Micromechanical Fracture Models[J]. Engineering Structures, 2008, 30: 3325-3335.
- [56] WANG Y Q, ZHOU H, SHI Y J, et al. Fracture Prediction of Welded Steel Connections Using Traditional Fracture Mechanics and Calibrated Micromechanics Based Models[J]. International Journal of Steel Structures, 2011, 11(3): 351-366.
- [57] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Cyclic Void Growth Model to Assess Ductile Fracture Initiation in Structural Steels Due to Ultra Low Cycle Fatigue[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(6): 701-712.
- [58] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Validation of Cyclic Void Growth Model for Fracture Initiation in Blunt Notch and Dogbone Steel Specimens[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(9): 1528-1537.
- [59] FELL B V, MYERS A T, DEIERLEIN G G, et al. Testing and Simulation of Ultra-low Cycle Fatigue and Fracture in Steel Braces[C]//Earthquake Engineering Research Institute. Proceedings of the 8th U. S. National Conference on Earthquake Engineering. Oakland; Earthquake Engineering Research Institute, 2006: 1-10.
- [60] MYERS A T. Testing and Probabilistic Simulation of Ductile Fracture Initiation in Structural Steel Components and Weldments[D]. Stanford; Stanford University, 2009.
- [61] ZHOU H, WANG Y Q, SHI Y J, et al. Extremely Low Cycle Fatigue Prediction of Steel Beam-to-column Connection by Using a Micro-mechanics Based Fracture Model[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48: 90-100.
- [62] LIAO F F, WANG W, CHEN Y Y. Parameter Calibrations and Application of Micromechanical Fracture Models of Structural Steels[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2012, 42(2): 153-174.
- [63] 廖芳芳. 钢材微观断裂判据研究及在节点延性断裂预测中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2012.
- LIAO Fang-fang. Study on Micromechanical Fracture Criteria of Structural Steels and Its Applications to Ductile Fracture Prediction of Connections [D]. Shanghai; Tongji University, 2012.