

焊接式索夹疲劳寿命分析方法及评价

李鸿盛¹, 张志新², 薛松领^{3*}, 王志诚⁴

(1. 中交一公局重庆万州高速公路有限公司, 重庆市 404100; 2. 中交第一公路工程局有限公司, 北京市 100024;
3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 4. 中交公路规划设计院有限公司, 北京市 100088)

摘要:针对焊接式索夹在新田长江大桥中应用的实际情况,通过数值计算分析焊接式索夹的疲劳性能并对焊接式索夹的疲劳寿命做出评价。首先建立新田长江大桥的有限元模型,分析该桥在恒载和疲劳荷载下的静力特性。然后分析焊接式索夹的几何构造并建立焊接式索夹的数值模型,利用子模型技术分析该索夹在不同荷载下的力学特性。最后,根据相关规范比较适用于新田长江大桥焊接式索夹焊缝的疲劳试验数据,通过经验公式与FE-SAFE计算出焊接式索夹焊缝的疲劳寿命。研究表明:数值计算和经验公式计算结果较为接近,该索夹的对数疲劳寿命约为10。新田长江大桥焊接式索夹在设计使用年限内不会发生疲劳破坏。

关键词:桥梁工程;焊接式索夹;疲劳寿命;数值计算;试验研究

中图分类号:U444

文献标志码:A

0 引言

在过去的30年,中国的大跨度现代悬索桥得到了飞跃发展,不仅数量上从无到目前已经建成接近70座,而且武汉杨泗港桥主跨跨径已经达到1700 m,2000 m以上跨度的悬索桥也在设计中^[1-4]。到目前为止,中国已经建成和在建的跨度超过1000 m的悬索桥接近25座,超过了世界上其他国家这种跨度桥梁的总和。除了跨度和数量迅速增长取得了举世瞩目的成就外,中国还在悬索桥结构创新上有许多新的发展,如厦门海沧大桥,采用三跨连续加劲梁全漂浮体系、湖南湘西矮寨大桥采用塔梁分离的悬索桥体系、泰州长江公路大桥采用两主跨的三塔主缆连续悬索桥体系,在世界上率先建成了主跨超过1000 m的主缆连续三塔大跨度悬索桥;金沙江虎跳峡大桥则采用复合索鞍的独塔单跨地锚式悬索桥^[5-8],创新性地设计了一种能利用山区特殊地形的新型悬索桥。在上述所有的现代悬索桥中,索夹都是采用铸造加工工艺进行制造,一直没有较大的技术变革,其中的主要原因值得探讨。

在悬索桥中,索夹是联系主缆与吊索的关键构件,在悬索桥建成后,索夹应箍紧主缆,保证索夹与主缆间的相对位置固定,同时应将吊索力传递给主缆,因此其在悬索桥的运营过程中起到至关重要的作用^[9],设计制造中既要求方便加工,又要保证其具有较强的承受各种外荷载(包括交变荷载)的能力。铸造加工索夹虽然存在工艺复杂、铸造缺陷多、材料强度较低、对低温环境适应差、生产过程对环境污染大、生产周期长,铸钢件毛坯的返修、报废率高、生产效率低,低温环境使用受限等方面的不足,但是铸造件中无焊缝,其疲劳强度高是其优点,也是工程中长期采用这种加工工艺制造索夹的主要原因。

焊接索夹可采用工业化钢厂制造加工的钢板,其材料可直接采购,质量可靠,并可以根据需求,选择适合的适应低温环境需求的材料。因此焊接制造加工索夹成型方便、承载能力大、可满足低温环境使用要求、加工过程绿色环保、结构可靠安全、具有高性价比。这种索夹既可以保证索夹体的内在质量又能够提高其承载能力,同时还可以满足低温环境使用要求。研究解决索夹设计与制造的关键技术,将推动悬索桥索夹的制造技术、质量水平的大幅提高

收稿日期:2021-12-10(修改稿)

作者简介:李鸿盛,男,大学本科,高级工程师.E-mail:lihongsheng@163.com

*通信作者:薛松领,男,博士研究生.E-mail:920490176@qq.com

并明显改善和弥补现有工艺的不足。

焊接索夹由钢板焊接制作,构件中将存在较多的焊缝。索夹的本身与吊索的连接件基本处于交变的受拉应力状态,因此焊缝在交变应力下的疲劳性能,是决定焊接索夹能否在全寿命周期中安全可靠应用的关键。

为使焊接索夹能应用到实际工程中,在万州新田长江大桥建设中,开展了焊接式索夹关键技术研究。研究中通过比选,确定了焊接索夹的合理结构形式,

进行了索夹的疲劳试验,本文介绍其疲劳性能分析。

1 桥梁背景介绍与焊接式索夹结构简介

万州新田长江大桥是主跨1 020 m双塔单跨悬索桥,其跨径布置为 $(247+1\,020+280)\text{ m}=1\,547\text{ m}$ 。中跨垂跨比为1/10,主缆横桥向中心间距为26.5 m,吊索顺桥向标准间距为18 m。新田长江大桥总体布置图见图1。

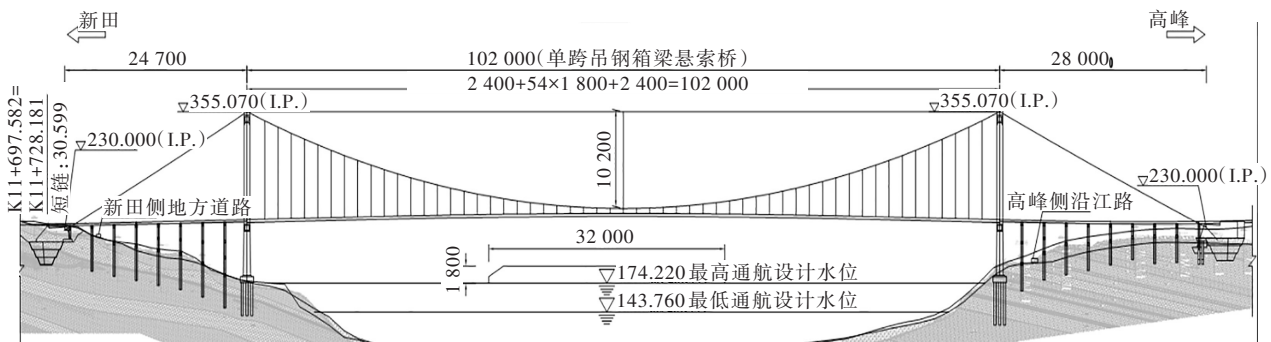


图1 新田长江大桥总体布置图(除标高为m外,其余单位:cm)

边跨无吊索索夹和中跨有吊索的SJ5类索夹中8个索夹采用了焊接式索夹。焊接式索夹结构尺寸见图2。

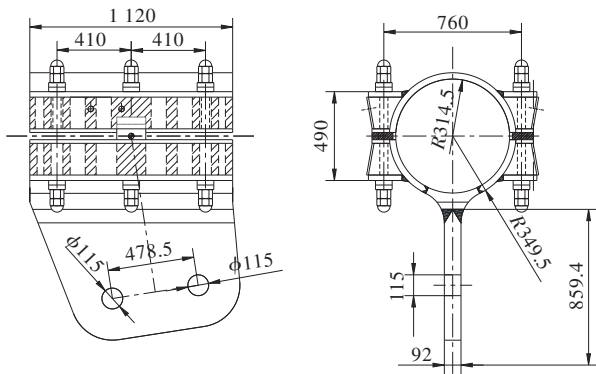


图2 焊接式索夹结构图(单位:mm)

由图2可知:索夹长度为1 120 mm,内径为314.5 mm,壁厚为35 mm,高度为490 mm,采用MJ45×3 mm螺杆6个,每个螺杆预紧力为817 kN。共有3条受拉焊缝,4条角焊缝。

2 焊接式索夹疲劳寿命分析方法与流程

焊接式索夹作为万州新田长江大桥的一种新型索夹结构,其受拉焊缝在交变应力和初始几何缺陷

的影响下,必然成为疲劳裂纹萌生乃至疲劳破坏危险位置。因此,对焊接式索夹焊缝进行疲劳评价具有非常重要的意义。

预测焊接式索夹焊缝的疲劳寿命,在计算之前,必须先分析其焊接式索夹受力性能,尤其是焊缝的受力状态,此过程的分析可以借助通用有限元软件实现。在计算疲劳寿命时,首先必须确定其结构材料参数,考虑初始缺陷及残余应力影响的焊缝疲劳参数可查找相关规范给出的试验数据。

在确定了材料疲劳参数的基础上,还需考虑焊接式索夹焊缝的几何形状、连接方式和加工质量等其他因素影响。在桥梁实际运营过程中,影响焊接式索夹焊缝疲劳寿命的因素多且复杂,要考虑所有因素对其疲劳寿命的影响是不可能的。因此必须选择合理的标准来评估焊接式索夹的疲劳寿命。

分析流程如下:首先建立全桥有限元模型,利用英国规范、欧洲规范、美国规范和中国规范计算出索夹处吊索施加的疲劳荷载力幅;然后建立焊接式索夹的有限元模型,计算出索夹焊缝处的应力幅,利用ABAQUS-FE-SAFE计算出疲劳寿命。通过将BS 7608规范、IIW标准规范和有限元数值模拟计算结果相互对比,得出焊接式索夹焊缝处疲劳寿命。具体分析

流程见图 3。

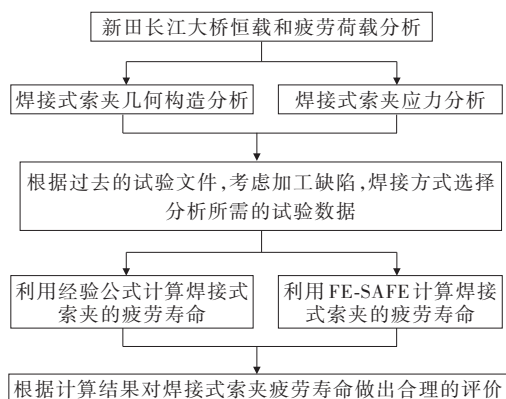


图 3 焊接式索夹疲劳寿命分析流程图

3 焊接索夹焊缝应力分析

建立新田长江大桥有限元模型如图 4 所示,分别按照英国 BS 5400 规范、美国 AASHTO2017 规范、欧洲 Eurocode1 规范以及中国《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中桥梁疲劳标准荷载谱的计算方法,计算出新田长江大桥焊接索夹吊索的荷载值,计算结果见表 1。不同规范具体加载方式见《抗疲劳钢桥面板关键技术》^[10]。

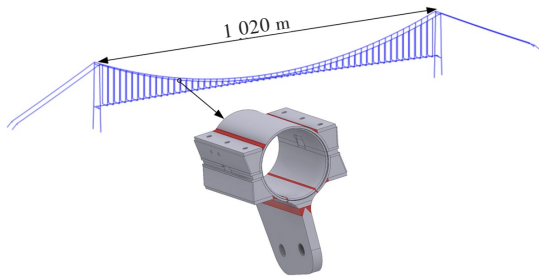


图 4 新田长江大桥有限元模型

表 1 各国规范计算的焊接索夹吊索荷载值 kN

规范	恒载	吊索最不利荷载	吊索力疲劳幅
BS 5400	—	2 332.9	352.3
AASHTO 2017	—	2 296.5	315.9
Eurocode 1	—	2 286.4	305.8
JTG D64—2015	1 980.6	2 330.2	349.4

由表 1 可知:BS 5400 规范计算结果偏大,Eurocode 1 计算结果偏小,中国规范计算结果与 BS 5400 规范计算结果接近。安全起见认为吊索疲劳幅为 360 kN。建立焊接式索夹有限元模型如图 5 所示。

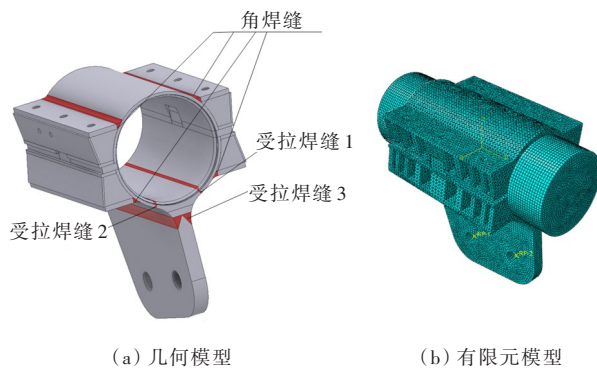


图 5 焊接式索夹模型

如图 5(a)所示,焊接式索夹有 4 条角焊缝和 3 条受拉焊缝,角焊缝的作用是将螺栓座与索夹本体连接,不在索夹传力的关键路线上,不是本文研究的对象。索夹本体上的 2 条受拉焊缝和耳板上的受拉焊缝,位于吊索力和螺栓力传力的关键路线上,受到交变荷载的作用,因此需对这 3 条受拉焊缝进行疲劳分析。焊接式索夹采用钢构件,弹性模量 $E=210\text{ GPa}$,泊松比为 0.3。主缆的弹性模量采用等效弹性模量计算,在紧缆前其初始空隙率为 20%,在紧缆后其空隙率为 18%,等效弹性模量为 3.7 GPa,泊松比为 0.3^[11]。焊缝采用 E55 型焊条,其屈服强度为 440 MPa,抗拉强度为 550 MPa。主缆与索夹之间采用库仑摩擦接触,摩擦系数取 0.15。其装配有限元模型见图 5(b)。

用 6 个 B31 梁单元来模拟螺栓,螺栓力为 $(817 \times 6)\text{ kN}$ 。采用实体单元模拟索夹和主缆。恒载下吊索力为 1 980.6 kN,最不利荷载吊索力取 2 340 kN。计算分两个分析步:第 1 个分析步为施加螺栓力,第 2 个分析步为在第 1 个分析步后施加吊索力。为了精细化求解焊缝处应力分布,采用子模型技术对焊缝进行精细化分析(图 6)。

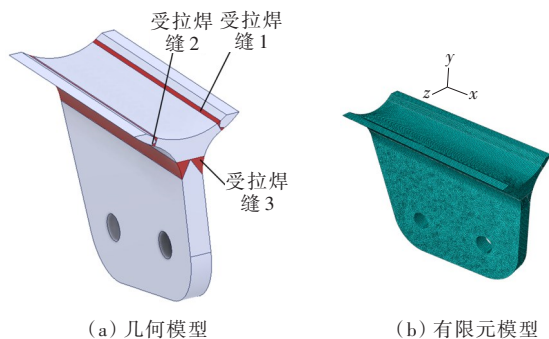
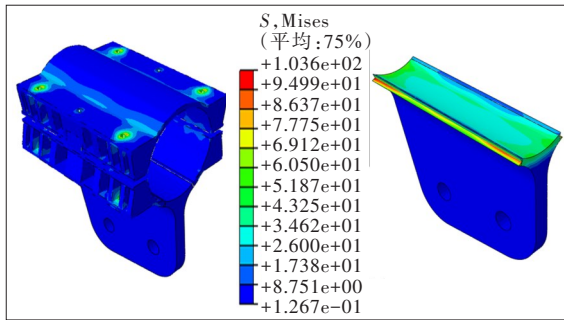


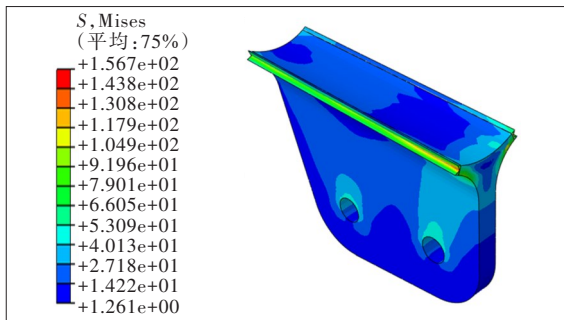
图 6 焊接式索夹子模型

如图 6(a)所示,为了防止分析过程中由于网格

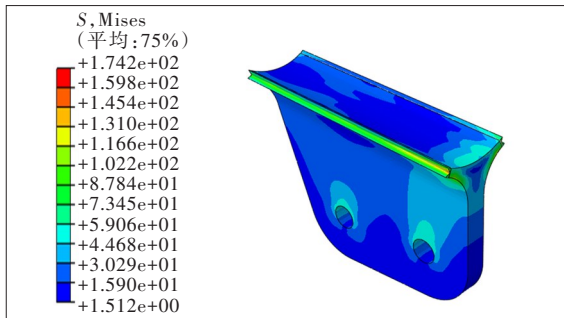
划分而产生应力奇异的现象,选取子模型进行细化分析。如图6(b)所示,采用自适应网格技术,以前后两次应力差相差不超过5%为准则划分出比较合理的网格。对索夹螺栓加预紧力荷载817 kN,提取焊缝处结构应力,分析结果见图7(a)。在螺栓力作用的基础上,对焊接式索夹分别施加恒载和最不利疲劳荷载,其计算结果如图7(b)、(c)所示。



(a) 螺栓力作用下焊缝的应力



(b) 螺栓力与恒载作用下焊缝的应力



(c) 螺栓力与恒载和疲劳荷载作用下焊缝的应力

图7 焊接式索夹力学分析结果(单位:MPa)

由图7可知:在螺栓处出现了应力集中。但此应力集中对其整体性能可忽略不计,提取焊缝处的应力结果,在焊根处出现的最大应力为103.6 MPa,低于焊头的屈服强度不会发生静力破坏。在恒载作用下焊缝处最大应力由焊根处变为焊趾处,最大应力为156.7 MPa,焊缝不会发生静力破坏。在疲劳荷载下焊趾处最大应力为174.2 MPa,焊趾处的应力幅度

为17.5 MPa。

4 焊接式索夹疲劳寿命评估

依据BS 7608标准《Fatigue design and assessment of steel structures》^[12]和国际焊接疲劳协会的《Document recommendations for fatigue design of weld joints and components》^[13]计算焊缝的疲劳寿命。

$$\lg N = \lg C_0 - d\sigma - m \lg S_r \quad (1)$$

式中: N 为疲劳作用次数; C_0 和 m 为试验获得的材料参数; $d\sigma$ 为考虑95%置信度所取的离散性系数; S_r 为应力变化范围。

图5所示的焊缝可看作B级焊缝,查BS 7608标准,式(1)变为式(2):

$$\lg N = 15.3697 - 2 \times 0.1821 - 4 \lg 17.5 = 10.03 \quad (2)$$

类似BS 7608标准,IIW标准的S-N曲线数据也是基于名义应力法在试验室获得的。疲劳试验数据考虑了局部应力集中、一定范围内的焊缝尺寸和形状偏差、残余应力、焊接过程和随后的焊缝改善措施等。根据IIW标准,可以认为该接头疲劳强度等级属于FAT=100。对于每一等级接头所施加应力变化范围 ΔS 与达到疲劳的循环数 N 之间的关系为:

$$\lg N = \lg C - m \lg \Delta S \quad (3)$$

式中: C 为与S-N曲线相关的常数,此处 $C=2 \times 10^{16}$; m 为双对数S-N曲线的反向斜率,此处 $m=5$,将数据代入式(3)可得:

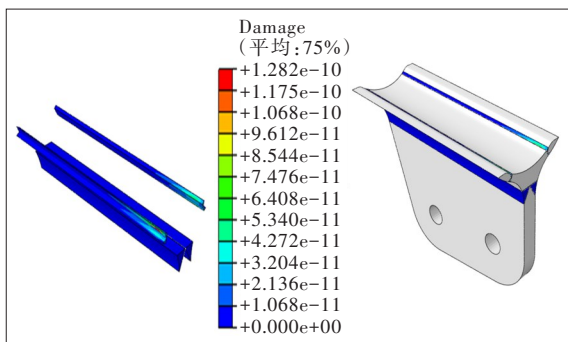
$$\lg N = \lg (2 \times 10^{16}) - 5 \lg \Delta S \quad (4)$$

可求得 $\Delta S=100$ MPa,由于焊缝厚度小于25 mm,因此无需厚度修正。焊缝处的疲劳应力幅为17.5 MPa,远小于 ΔS ,因此该焊缝满足疲劳设计要求。

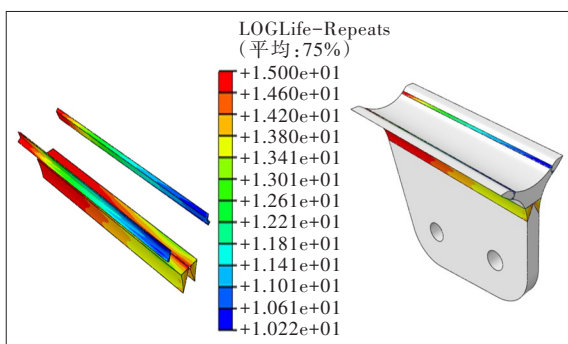
$$\lg N = \lg (2 \times 10^{16}) - 5 \lg 17.5 = 10.08 \quad (5)$$

利用FE-SAFE计算焊缝疲劳寿命以及损伤分布,计算结果见图8。

由图8可知:焊接式索夹最不利区域的对数疲劳寿命 $\lg N=10.22$,即 1.65×10^{10} 次。对数疲劳寿命按照BS 7608标准理论计算结果为10.03,即 1.07×10^{10} 次。按照IIW标准理论计算结果为10.08,即 1.2×10^{10} 次。有限元计算结果与理论计算结果接近。但理论计算不能反映整个焊缝的疲劳寿



(a) 焊缝疲劳损伤分布



(b) 焊缝对数疲劳寿命分布

图 8 焊缝疲劳寿命以及损伤分布计算结果

命分布情况,有限元计算恰好解决了这一问题。焊接式索夹采用高质量钢板,除焊缝外的名义疲劳极限强度为 172.5 MPa,焊接式索夹除焊缝外的其余部分应力远低于该数值,因此不会发生疲劳破坏。其余受拉焊缝应力幅也远低于名义疲劳极限强度,不会发生疲劳破坏,这也是不考虑其余部分疲劳破坏分析的原因。

5 结论

以新田长江大桥焊接式索夹为研究对象,首先建立整体模型和子结构模型计算索夹的疲劳应力幅以及应力分布情况。然后利用国外规范给出的 S-N 曲线计算其疲劳寿命。最后利用 FE-SAFE 计算其损伤分布以及疲劳寿命分布。得到以下结论:

(1) 焊接式索夹疲劳只出现在受拉焊缝处。

(2) 焊接式索夹疲劳受拉焊缝处的疲劳应力幅度很小,仅为 17.5 MPa,在设计使用年限内不会发生疲劳破坏。

(3) 焊接式索夹疲劳失效模式由焊趾处向外扩展,与许多焊接结构类似。

(4) 分析过程并没有考虑由于环境产生的腐蚀影响,可能使计算的疲劳寿命结果偏大。

参考文献:

- [1] 毛伟琦,胡雄伟.中国大跨度桥梁最新进展与展望[J].桥梁建设,2020,50(1):13-19.
- [2] 陈楠樨.跨山越海的中国大桥[J].交通建设与管理,2019(4):30-33.
- [3] 张晋瑞,陈国平,胡建华,等.大跨径悬索桥超高性能轻型组合桥面施工控制研究[J].中外公路,2020,40(1):85-91.
- [4] ZHANG M, WAN T B, WANG Y L. Design and static analysis of the Taizhou Yangtze River Bridge, China[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering, 2015, 168(1): 52-63.
- [5] 沈锐利,薛松领,马健,等.独塔单跨地锚式悬索桥复合索鞍试验研究[J].桥梁建设,2019,49(5):15-20.
- [6] 刘春,余化彪,李德宏.虎跳峡金沙江大桥桥型方案比选分析[J].中外公路,2020,40(4):130-133.
- [7] 韩艳,李凯,孙一婵,等.基于现场实测的大跨钢桁悬索桥疲劳可靠度分析[J].公路交通科技,2020,37(4):72-80.
- [8] XUE S L, SHEN R L, CHEN W, et al. Corrosion fatigue failure analysis and service life prediction of high strength steel wire[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 110: 104440.
- [9] XUE S L, SHEN R L, SHAO M L, et al. Fatigue failure analysis of steel wire rope sling based on share-splitting slip theory[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 1189-1200.
- [10] 孟凡超,张清华,谢红兵,等.抗疲劳钢桥面板关键技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [11] MIAO R S, SHEN R L, WANG L, et al. Theoretical and numerical studies of the slip resistance of main cable clamp composed of an upper and a lower part[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(4): 691-705.
- [12] Standard B. BS 7608-1993 Fatigue design and assessment of steel structures[S]. 1999.
- [13] HOBACHER A F. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.