

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.029

# 螺栓力损失对焊接式索夹疲劳性能的影响

宋健<sup>1</sup>,薛松领<sup>2\*</sup>,李辉<sup>1</sup>,李鸿盛<sup>1</sup>

(1.中交一公局重庆万州高速公路有限公司,重庆市 404100;2.西南交通大学,四川 成都 610031)

**摘要:**索夹在使用过程中将发生螺栓力的松弛,从而引起索夹构件上的应力幅发生变化;对于焊接式索夹,将导致焊缝处疲劳性能的变化。该文以万州新田长江大桥焊接式索夹螺栓力在运营过程中松弛情况为例,研究螺栓力松弛对其焊缝疲劳寿命的影响。首先分析焊接式索夹几何外形和构造特点,建立带螺栓的焊接式索夹数值模型;其次分析焊接式索夹在恒载和疲劳荷载下的应力分布,研究焊接式索夹的力学特性;然后对焊接式索夹施加不同螺栓力,研究在螺栓力损失下的应力幅的变化情况;最后,利用适合于该文研究模型的试验数据分析螺栓力松弛对焊接式索夹疲劳寿命的影响。研究表明:螺栓力损失虽然降低了焊接式索夹的焊缝应力,但却增加了焊缝的应力幅度,从而导致焊接式索夹焊缝疲劳寿命的下降,应力幅度越大,此种现象越明显。

**关键词:**焊接式索夹;焊缝应力幅度;螺栓力损失;疲劳寿命

**中图分类号:**U448.25

**文献标志码:**A

## 0 引言

在悬索桥中,索夹通过螺栓紧固在主缆之上,通过对螺栓提供预紧力从而保证索夹不会发生滑移。然而在悬索桥运营的过程中,螺栓力会发生松弛<sup>[1-3]</sup>。如泰州长江大桥、南京第四长江大桥及西堠门大桥等桥梁的索夹螺栓均发生过松弛现象。索夹螺栓力松弛受许多因素的影响,如螺栓紧固顺序、接触面材料及结合面间隙等。由此可见,在悬索桥运营过程中螺栓力松弛是不可避免的<sup>[4-6]</sup>。螺栓力松弛对悬索桥结构及相连构件产生的影响需根据具体问题具体分析。

重庆万州新田长江大桥是一座主跨1 020 m单跨悬吊钢箱加劲梁悬索桥,其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。万州新田长江大桥首次采用焊接索夹,在全寿命周期中,不同状态下索夹焊缝疲劳是设计和建造最为关心的问题。本文研究在桥梁运营过程中索夹螺栓力松弛对焊接式索夹焊缝疲劳性能的影响。首先对焊接式索夹进行几何构造分析;然后通过

Abaqus建立焊接式索夹有限元模型,分析索夹在不同的吊索力下和不同的螺栓力损失情况下的应力分布。对比分析了螺栓力损失对焊接式索夹焊缝应力幅的影响。通过规范所提供的适用本模型的试验数据,计算出相应的疲劳寿命。最后对螺栓力松弛对焊接式索夹疲劳性能的影响做了相应的评价。

## 1 分析方法与流程

分析之前,必须明确结构的材料属性,材料属性的正确选择直接关系到模型分析的准确性。本文通过查找之前的参考文献以及试验数据给出了模型的材料属性;其次必须充分了解结构的几何构造,本文建立与实际情况相同的数值模型,此过程可借助通用有限元软件实现。

在确定了合适的材料参数之后,建立重庆万州新田长江大桥全桥模型,分析焊接式索夹在吊索力以及螺栓力共同作用下的受力状态。通过改变螺栓力而实现焊缝处应力幅的变化,研究螺栓力的松弛对焊缝处应力幅的影响。查找适合于本模型的相应

收稿日期:2023-01-13

作者简介:宋健,男,大学本科,工程师.E-mail:1083535607@qq.com

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

文件的试验数据分析螺栓力松弛对焊接式索夹疲劳性能的影响。具体分析流程图如图1所示。

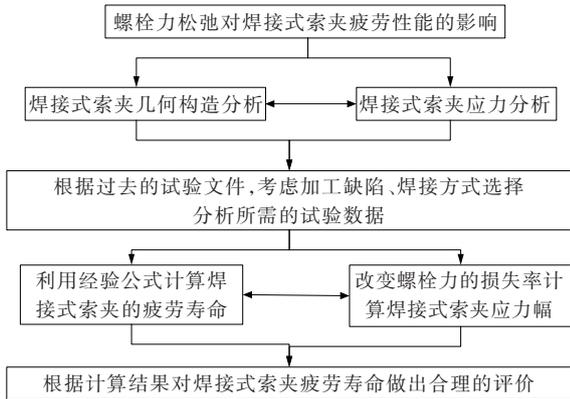


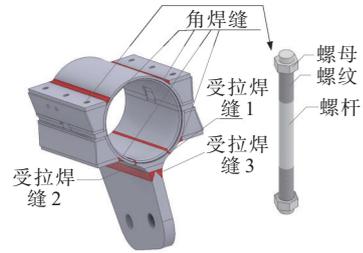
图1 分析流程图

## 2 螺栓力松弛对索夹焊缝应力幅的影响

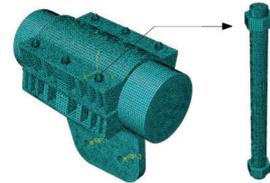
### 2.1 焊接式索夹应力分析

建立如图2所示的焊接式索夹模型,由图2(a)可知:焊接式索夹共有4条角焊缝和3条受拉焊缝。其中受拉焊缝受到疲劳荷载的作用,因此需对这3条受拉焊缝进行疲劳分析。螺栓弹性模量为 $E=210\text{ GPa}$ ,泊松比为0.3。螺栓之间法向接触采用增广的拉格朗日算法,切向接触采用罚函数算法,摩擦系数为0.15。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 $3.7\text{ GPa}$ ,泊松比为0.3<sup>[7]</sup>。焊缝采用E55型焊条,其屈服强度为 $440\text{ MPa}$ ,抗拉强度为 $550\text{ MPa}$ 。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2(b)。

焊接式索夹采用6个螺栓,螺栓力均为 $817\text{ kN}$ 。螺栓力会在紧缆的过程中发生损失,在紧缆后对损失的螺栓力进行补充,使螺栓力保持为 $817\text{ kN}$ 。在实际桥梁的运营过程中,焊接式索夹上的螺栓处于常温状态,故可以忽略螺栓的高温蠕变影响。大量参考文献表明:在不考虑螺栓由于蠕变引起的松弛效应时,螺栓力的损失主要由机械松动引起,在本模型中考虑由于吊索疲劳荷载振动引起螺栓相对滑动而导致的螺栓力损失。万州新田长江大桥恒载下分析出索夹受到吊索力为 $1\,980.6\text{ kN}$ 。



(a) 几何模型



(b) 有限元模型

图2 焊接式索夹分析模型图

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,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。分析结果如图3所示。

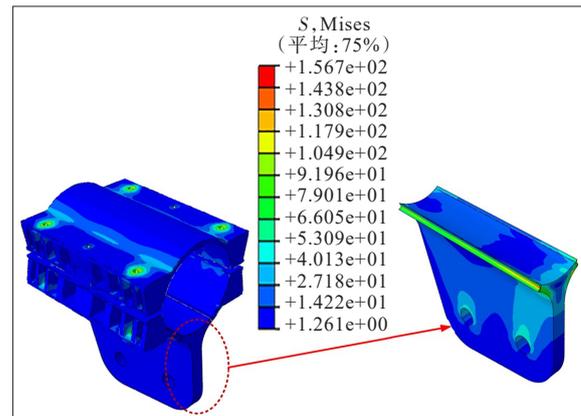


图3 紧缆后恒载作用下焊接式索夹应力(单位:MPa)

由图3可知:紧缆后恒载作用下焊接式索夹焊缝最大应力为 $156.7\text{ MPa}$ ,远低于材料屈服强度。在焊缝处和螺栓处有应力集中。

### 2.2 螺栓力损失对焊缝应力幅的影响分析

万州新田长江大桥恒载和疲劳荷载下分析出索夹受到吊索力为 $2\,340\text{ kN}$ 。按照2.1节所示方法,分析焊接式索夹在此吊索力下的应力分布。在桥梁的运营过程中索夹上螺栓力会发生损失,分别考虑螺栓力损失5%,10%,15%,...,40%,45%时焊接式索夹应力分布,并分析螺栓力损失对焊缝应力幅的影响。图4为焊接式索夹在恒载作用下焊缝应力分布随螺栓力损失变化图。图5为焊接式索夹在疲劳荷

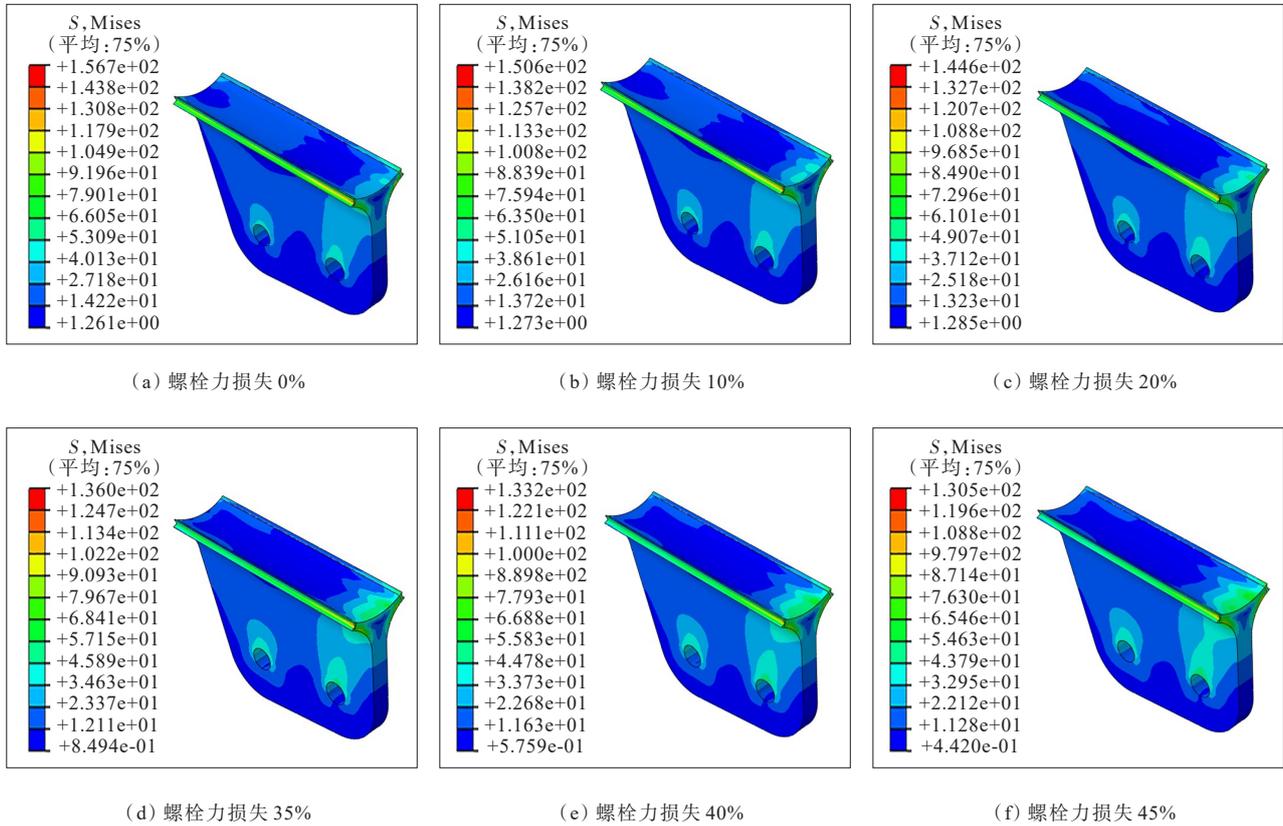


图4 恒载作用下随螺栓力损失的焊缝应力分布(单位:MPa)

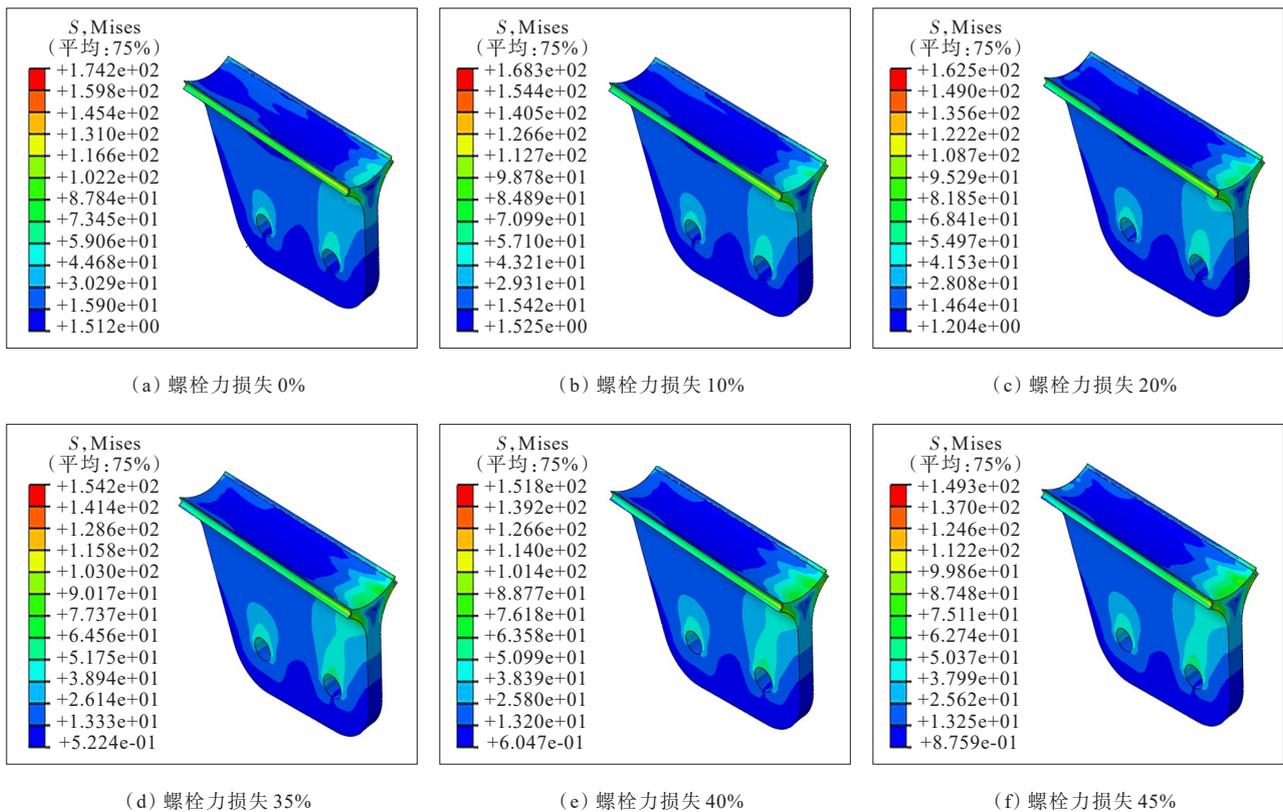


图5 疲劳荷载作用下随螺栓力损失的焊缝应力分布(单位:MPa)

载作用下焊缝应力分布随螺栓力损失变化图。提取Abaqus中的计算结果,详细计算结果见表1、2。

表1 恒载下计算结果

步骤	吊索力/ kN	螺栓力/ kN	螺栓力损 失/%	焊缝最大 应力/MPa
step-1	0	817.00	0	103.6
step-2	1 980	817.00	0	156.7
step-3	1 980	776.15	5	153.7
step-4	1 980	735.30	10	150.6
step-5	1 980	694.45	15	147.6
step-6	1 980	653.60	20	144.6
step-7	1 980	612.75	25	141.7
step-8	1 980	571.90	30	138.8
step-9	1 980	531.05	35	136.0
step-10	1 980	490.20	40	133.2
step-11	1 980	449.35	45	130.5

表2 疲劳荷载下计算结果

步骤	吊索力/ kN	螺栓力/ kN	螺栓力 损失/%	焊缝最大 应力/MPa	应力幅/ MPa
step-1	0	817.00	0	103.6	
step-2	2 340	817.00	0	174.2	17.5
step-3	2 340	776.15	5	171.2	17.5
step-4	2 340	735.30	10	168.3	17.7
step-5	2 340	694.45	15	165.4	17.8
step-6	2 340	653.60	20	162.5	17.9
step-7	2 340	612.75	25	159.7	18.0
step-8	2 340	571.90	30	156.9	18.1
step-9	2 340	531.05	35	154.2	18.2
step-10	2 340	490.20	40	151.8	18.6
step-11	2 340	449.35	45	149.3	18.8

由图4、5和表1、2可知:螺栓力的损失使索夹的应力状态发生了改变,焊缝处的应力有所降低,恒载下焊缝处的最大应力由156.7 MPa变为130.5 MPa,疲劳荷载下焊缝处的最大应力由174.2 MPa变为149.3 MPa,但应力幅却增大,由17.5 MPa变为18.8 MPa。螺栓力损失了45%,应力幅增大了7.4%。

### 3 螺栓力松弛对焊接式索夹疲劳寿命的影响

对于疲劳分析典型的计算方法有以试验为代表

的S-N曲线<sup>[8-10]</sup>,以计算力学为代表的断裂力学和最近几年兴起的近场动力学等<sup>[11-15]</sup>。利用计算力学的方法计算疲劳断裂时,在裂纹尖端处会遇到应力奇异的现象,近场动力学利用积分运算代替微分运算可很好地解决这一现象,但计算量非常大不适合工程应用,本文利用适用于本模型情况以试验为代表的S-N曲线评价螺栓力松弛对索夹焊缝疲劳寿命的影响。

依据国际焊接疲劳协会标准计算焊缝的疲劳<sup>[16-17]</sup>。国际焊接疲劳协会标准的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。根据国际焊接学会标准,可以认为该接头疲劳强度等级为100。对于每一等级接头所施加应力变化范围 $\Delta S$ 与达到疲劳的循环数 $N$ 之间的关系为:

$$\lg N = \lg C - m \lg \Delta S \quad (1)$$

式中: $C$ 是与S-N曲线相关的常数。 $C=2 \times 10^{16}$ , $m=5$ ,为双对数S-N曲线的反向斜率。

对表2中的数据利用式(1)进行计算,得到相应的疲劳计算结果如图6所示。

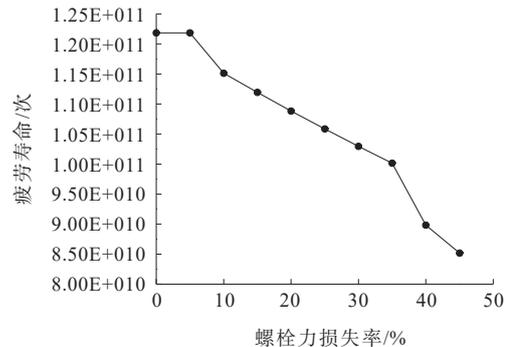


图6 焊接式索夹焊缝疲劳寿命与螺栓力损失关系

由图6可知:随螺栓力损失率增大,疲劳寿命呈下降趋势。当螺栓力损失很小时,即5%以内,螺栓力损失对疲劳寿命没有影响;当螺栓力损失为10%~35%,螺栓力损失使疲劳寿命下降,且呈线性下降关系;当螺栓力损失超过35%后,螺栓力损失对疲劳寿命影响发生了突变,螺栓力损失使疲劳寿命迅速下降,但在设计使用年限之内(200万次疲劳荷载作用下),焊接式索夹仍然不会发生疲劳破坏。

## 4 结 论

本文研究了桥梁运营过程中焊接式索夹螺栓力损失与焊接式索夹焊缝疲劳问题。建立带螺杆的索夹精细化有限元模型,研究螺栓力损失与焊接式索夹焊缝应力幅变化及疲劳寿命之间的关系。得到如下结论及不足之处:

(1) 螺栓力损失使焊接式索夹应力变小,焊接式索夹焊缝应力幅增大。

(2) 螺栓力损失导致了焊接式索夹焊缝疲劳寿命的降低,但影响不大,在设计使用年限之内,焊接式索夹仍然不会发生疲劳破坏。

(3) 建议在使用过程中应保持螺栓力的松弛控制在 35% 以下,在保证索夹抗滑能力的同时,延长索夹疲劳寿命。

(4) 本文研究螺栓力的损失时并没有考虑高强螺栓松弛的原因,只考虑了螺栓力松弛对疲劳的影响。本文研究也没有考虑其他因素对焊接式索夹焊缝疲劳的影响。

### 参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 黎志忠,蒋劲松.悬索桥上、下对合型索夹结构分析研究[J].桥梁建设,2013,43(3):60-65.
- [4] 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.
- [5] 张鹏飞.悬索桥索夹螺杆预紧力下降原因分析与预防性养护对策[J].公路,2019,64(2):101-105.
- [6] 冯传宝.五峰山长江大桥上部结构施工控制技术[J].桥梁建设,2020,50(1):99-104.
- [7] 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.
- [8] TANG H B, CHEN Z X, AVINESH O, et al. Notch insensitivity in fatigue failure of chopped carbon fiber chip-reinforced composites using experimental and computational analysis[J]. Composite Structures, 2020, 244: 112280.
- [9] 张志勇,崔毅,王一,等.基于裂纹扩展的低速柴油机机座寿命分析[J].机械强度,2020,42(6):1466-1472.
- [10] 王春生,张静雯,段兰,等.长寿命高性能耐候钢桥研究进展与工程应用[J].交通运输工程学报,2020,20(1):1-26.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈壮,万冀,楚锡华.近场动力学框架下的键基对应模型[J].计算力学学报,2020,37(3):278-283.
- [14] 朱海,许飞云,杨会超.基于近场动力学的二维疲劳裂纹扩展模型[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(4):705-711.
- [15] 乔丕忠,张勇,张恒,等.近场动力学研究进展[J].力学季刊,2017,38(1):1-13.
- [16] HOBACHER A F. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [17] STANDARD B. BS 7608—1993 Fatigue design and assessment of steel structures[S], 1999.