基于 IIW 标准的客车焊接结构疲劳损伤分析

郭福森

(厦门威迪思汽车设计服务有限公司,福建 厦门 361000)

摘 要:为了评估某客车焊接结构的疲劳性能,给出了基于 IIW 标准进行焊接结构疲劳损伤计算的方法和流程。该方法使用的 S-N 曲线考虑了焊接结构细节和工艺的影响。结果表明,损伤最大的测点出现在推力杆支座附近,对结构损伤最大的路面是振动路,与工程经验相符。

关键词:客车焊接结构; IIW 标准; 疲劳损伤

中图分类号:U461.7 文献标志码:A DOI:10.15917/j. cnki. 1006-3331. 2025. 01.007

Fatigue Damage Analysis of Bus Welded Structure Based on IIW Standard

GUO Fusen

(Xiamen Vehicle Designing & Service Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: To evaluate the fatigue performance of a bus's welded structure, the author presents a method and process for calculating the fatigue damage of the welded structure based on the IIW standard. This method employs the S-N curves which consider the effects of details and processes of the welded structure. The results indicate that the maximum fatigue damage occurs in the vicinity of the thrust rod supports and that vibrating road surfaces induce the most significant fatigue damage to the structure. These conclusions align with engineering experience.

Key words: bus welded structure; IIW standard; fatigue damage

客车骨架通常由薄壁管件、钣金件和机加工件焊 接而成。大量实践表明,客车骨架的疲劳断裂常常从 焊接区域开始。近年来,为实现车辆的轻量化,广泛 应用了减薄壁厚的高强钢,这使得结构应力水平增 大。但是采用高强钢并不能提高焊接区域的疲劳强 度,在实际应用中发现焊接区域的疲劳断裂问题更为 突出。

针对焊接结构的疲劳计算问题,国内轨道列车行 业的研究相对较多^[1-3],虽然客车行业也有一些研 究^[4-6],但前者有考虑焊接区域的 S-N 曲线,而后者 多数只考虑了母材的 S-N 曲线,两者存在较大的差 异。国际焊接学会 IIW 标准提供了大量的钢构件、铝 合金构件焊接区域的 S-N 曲线和焊接工艺改善建 议,并在工程上得到了广泛应用^[7]。本文借鉴轨道列 车行业的方法,通过试验获得某客车骨架主要区域的 随机动应力数据,然后基于 IIW 标准开展其焊接结构的疲劳损伤计算及分析。该方法是根据焊接结构细节和工艺来选择 S-N 曲线,可为客车焊接结构的可 靠性设计提供参考。

1 基于 IIW 标准的焊接结构疲劳计算方法

IIW 标准中分别提供了基于名义应力和热点应 力的 S-N 曲线,其置信度默认为 95%,这些数据是多 位国际著名专家通过大量试验获得的,试验条件已经 考虑了焊接工艺、载荷方向、局部应力集中和残余应 力的影响。

该标准中的名义应力是指排除了焊缝局部几何 变化引起的应力集中区域,在焊缝周边通过计算或测 量获得的应力。该标准中的热点应力是指焊接接头 危险点的应力,考虑了局部应力集中的影响,会比名

收稿日期:2024-10-08。

第一作者:郭福森(1989—),男,工程师,主要从事车辆结构 CAE 分析及研究工作。E-mail:guofs@ xmvds. com。

义应力大。危险点一般在焊缝的焊趾位置,存在结构 突变、不平整的情况。因此热点应力很难直接计算或 测量,通常是沿着危险点的载荷方向在平整区域获得 多个测量点的应力,再使用线性外推法求解得到。

该标准中的名义应力和热点应力分别表示焊缝 不同区域的应力,在焊缝疲劳评估中需要选择不同的 S-N曲线。本文通过试验获得客车骨架主要结构焊 接周边位置的名义应力,并将其用于焊缝疲劳损伤计 算。该方法操作简便、高效。

IIW 标准采用 Miners 损伤累积理论进行疲劳损 伤计算。假设结构在恒幅循环载荷作用下产生应力 幅值为 $\Delta\sigma_1$ 的循环应力数据,其循环次数为 n_1 ,在 S-N 曲线中应力幅值 $\Delta\sigma_1$ 对应的循环次数为 N_1 ,则这 段恒幅循环载荷对结构的疲劳损伤 $D_1 = n_1/N_1$ 。若 在随机载荷作用下,将产生的随机应力数据处理为 k级应力谱,即存在 k 个不同幅值的恒幅循环应力。第 i 个恒幅循环应力的应力幅值为 $\Delta\sigma_i$,其循环次数为 n_i ,产生的疲劳损伤为 D_i 。最后 k 个恒幅循环应力所 产生的总损伤 D 可定义为:

$$D = \sum_{i=1}^{k} D_i, \ D_i = n_i / N_i, \ N_i = C / \Delta \sigma_i^m \qquad (1)$$

式中: N_i 表示在 S-N 曲线中应力幅值 $\Delta \sigma_i$ 对应的循 环次数;m 为 S-N 曲线(S 为纵坐标,N 为横坐标)的 斜率,是无量纲常数;C 为常数,其值根据 IIW 标准选 取,其单位取决于m 的取值和 $\Delta \sigma_i$ 的单位($\Delta \sigma_i$ 默认 单位为 MPa)。

本文基于 IIW 标准进行焊接结构疲劳计算,其流 程如下:①布置应变片测点进行实车试验场道路测 试,以获得随机应力数据;②采用雨流计数法将随机 应力数据编制成应力谱;③根据测点所在焊接结构类 型及主要承载方向,在 IIW 标准中选择疲劳等级 (FAT)和其他疲劳参数,创建 S-N 曲线;④结合所编 制的应力谱和所选择的 S-N 曲线,采用 Miner 理论进 行焊接结构的疲劳损伤计算。

2 测点布置及动应力测试

有限的测点应布置在重要区域,可事先进行有限 元静强度计算,同时结合以往的动应力测试经验,分 析所测区域的结构载荷方向,从而确定测点位置和贴 片方向。本文最终在前后、左右空气悬架的气簧安装 座、推力杆支座和稳定杆支座附近的客车骨架焊缝周 边布置 30 个测点(前悬架附近 16 个、后悬架附近 14 个)。

试验车辆以满载状态在试验场路面进行随机动 应力测试,共8种典型路面:比利时路、卵石路、井盖 路、振动路、凹坑路、减速带、水泥路和铁轨,其中4种 如图1所示。不同路面的长度和车速见表1。



图1 4种典型路面

表1 路面长度及车速

序号	路面	长度/m	车速/(km·h ⁻¹)
1	比利时路	200	15
2	卵石路	125	15
3	井盖路	50	20
4	振动路	185	20
5	凹坑路	100	20
6	减速带	/	20
7	水泥路	200	25
8	铁轨	/	30

每一种路面都采集 3 次应变数据,然后对采集的 应变数据进行处理^[8],包括去零漂、去除异常信号、滤 波等,并将其转化为应力,为编制应力谱及以后的研 究做准备。图 2 为测点 108 在振动路上的随机应力 数据。

采用傅里叶变换将时域数据转化为频域数据,得 到应力功率谱密度。应力功率谱密度表征随时间波 动的应力信号在频率域内的能量分布情况,展示不同 频率下应力波动的强度^[9]。其中测点 108 在表 1 中 8 种路面上的应力功率谱密度曲线如图 3 所示。由 图 3 可知,路面载荷频率主要集中在 0~20 Hz,峰值 出现在 10~15 Hz 范围内;振动路、凹坑路和卵石路三 种路面上的应力波动强度较高,且在振动路上的应力 波动强度峰值是其他路面的两倍以上。



图 2 测点 108 在振动路的随机应力数据



图 3 测点 108 的应力功率谱密度

3 应力谱编制

应力谱是能够体现恒幅循环应力的应力幅值和 循环次数的图表。由于试验获得的随机应力数据是 变幅,具有无规律、不重复的特点,而 S-N 曲线是在 恒幅循环载荷下测得的材料特性曲线,其只适用于恒 幅循环应力的疲劳计算。因此本文采用雨流计数法 将随机应力数据化解为一系列的恒幅循环应力,并获 得各恒幅循环应力的应力幅值、应力均值和循环次 数。不考虑应力均值的影响,对均值不同而应力幅值 相同的循环次数进行累计,最后获得疲劳计算所需的 应力谱。

雨流计数法是统计分析方法中一种经典的双参 数计数方法,广泛用于处理疲劳分析中的随机载 荷^[10]。本文通过软件对图 2 所示的应力数据进行雨流计数。为保证计算精度,根据 IIW 标准要求应力幅 值划分不低于 8 级,本文设定为 16 级。最后获得的 测点 108 在振动路的应力雨流直方图如图 4 所示,图 中直观地展现出了应力幅值、应力均值和循环次数三 者的关系。进而获得的测点 108 在振动路的应力谱 见表 2。

同理可获得其他所有测点的应力谱。



图 4 测点 108 在振动路的应力雨流直方图

表 2 测点 108 在振动路的应力谱

级数 i	循环次数n _i /次	应力幅值 $\Delta \sigma_i$ /MPa
1	68	3.4
2	332	10. 1
3	357	16. 8
4	406	23.5
5	372	30. 2
6	358	37.0
7	194	43.7
8	132	50. 4
9	80	57.1
10	53	63. 8
11	28	70.6
12	16	77.3
13	8	84. 0
14	1	90. 7
15	2	97.4
16	2	104. 2

4 测点 S-N 曲线设定

依据 IIW 标准设定测点的 S-N 曲线。首先根据 焊缝接头形式(对接焊缝、角焊缝等)和载荷方向确 定疲劳等级(FAT),FAT 对应的是循环 200 万次的 应力幅值;然后根据 FAT 值查表获得 S-N 曲线参数: 最初斜率 m₁、常数 C₁、常幅疲劳极限、二次斜率 m₂、 常数 C₂、截止极限;最后绘制 S-N 曲线,如图 5 所示。 根据测点所在的焊缝接头形式将所有测点分为 4 种 类型,见表 3。



表 3 测点分类及 S-N 曲线参数

焊缝	FAT/	m1 2	C_1	常幅疲劳	m_2	$C_2/$	截止极限/	测点编号
类型	MPa		次・MPa ³	极限/MPa		次・MPa ⁵	MPa	
1	71	3	0.72×10 ¹²	41.5	5	1. 24×10 ¹⁵	16.5	101,102,106,107,112,114,115,201,202,206,207,212,214,215
2	80	3	1.02×10^{12}	46.8	5	2. 25×10 ¹⁵	18.6	108 113 208 213
3	90	3	1.46×10 ¹²	52.7	5	4. 05×10 ¹⁵	21.0	110,210
4	125	3	3. 91×10 ¹²	73.1	5	33. 13×10 ¹⁵	30.8	103 104 105 111 116 203 204 205 211 216

5 疲劳损伤计算

表 4 为测点 108 在振动路的损伤计算结果,以下 为损伤计算过程:

1) 由表 2 的应力谱获得 16 级的应力幅值 $\Delta \sigma_i$ 和循环次数 n_i 。

级数 i	损伤值 D_i	级数 i	损伤值D _i
1	0	9	1.46×10^{-5}
2	0	10	1.35×10^{-5}
3	0	11	9. 60×10^{-6}
4	1.30×10 ⁻⁶	12	7. 21×10^{-6}
5	4. 19×10 ⁻⁶	13	4. 63×10^{-6}
6	1. 10×10 ⁻⁵	14	7. 29×10^{-7}
7	1.37×10 ⁻⁵	15	1.81×10^{-6}
8	1.65×10^{-5}	16	2. 21×10 ⁻⁶

表 4 测点 108 在振动路的损伤计算结果

2)由表 3 可知,测点 108的焊缝为类型 2,其常 幅疲劳极限为 46.8 MPa,截止极限为 18.6 MPa。若 $\Delta \sigma_i < 18.6$ MPa,则损伤为 0;若 18.6 MPa $\leq \Delta \sigma_i < 46.8$ MPa,则斜率 m 取 5,常数 C 取 2.25×10¹⁵ 次·MPa⁵; 若 $\Delta \sigma_i \ge 46.8$ MPa,则斜率 m 取 3,常数 C 取 1.02× 10¹²次·MPa³。 3)根据公式(1)计算循环次数 N_i 和损伤值 D_i 。 由表 2 可知,第 4 级恒幅循环应力的应力幅值 $\Delta \sigma_4$ 为 23.5 MPa,循环次数 n_4 为 406,则 $N_4 = C/\Delta \sigma_4^m = 2.25 \times$ 10¹⁵ 次·MPa⁵÷23.5 MPa⁵=3.12×10⁸ 次, $D_4 = n_4/N_4 =$ 406 次÷(3.12×10⁸ 次)=1.30×10⁻⁶。

4) 最后计算得到测点 108 在振动路的总损伤

$$D = \sum_{i=1}^{16} D_i = 1.01 \times 10^{-4}$$

根据上述方法,计算得到所有测点在 8 种路面的 疲劳损伤。为了直观对比不同测点、不同路面的损伤情 况,将损伤数据转换为三维柱状图,如图 6 和图 7 所示。



图 6 不同路面下前悬架部位测点的损伤值柱状图



图 7 不同路面下后悬架部位测点的损伤值柱状图

由图 6 和图 7 可知,振动路对结构造成的疲劳损 伤明显高于其他路面,验证了图 3 的结果(振动路的 应力波动强度最大);同时可以发现,前悬架部位、后 悬架部位损伤值最大的测点分别为 108 号和 113 号, 均在推力杆支座附近的焊接结构处。

6 结 论

 采用 IIW 标准对某客车焊接结构进行疲劳损 伤评估,获得了损伤最大的测点和对结构造成最大损 伤的路面类型,能够为焊接结构设计提供参考。

2)根据公式(1)和表3可知,循环次数与应力幅值的m次方成反线性比例关系。当m=3时,若应力幅值减小一半,则循环次数为原来的8倍。由此可知,降低焊接处的应力水平可有效提高疲劳强度。

3)由于试验条件限制,通过实车道路测试只能获得主要区域的应力数据,后续可采用有限元模型瞬态计算的方法获得整车结构的应力数据,从而评估整

车结构的疲劳性能。

参考文献:

- [1] 谢素明,赵春骅,薛宁鑫.基于标准的轨道车辆碳钢车体承载焊接结构疲劳性能研究[J].大连交通大学学报,2022,43(5):24-29.
- [2] 王小杰,刘龙玺,赵思聪.基于三种不同疲劳评估标准的不 锈钢车体的焊缝疲劳评估[J].内燃机与配件,2021(7): 190-191.
- [3] 张猛,张春玉,李本怀,等.100%低地板车体铰接式有轨电车疲劳性能研究[J].大连交通大学学报,2019,40(2):24-28.
- [4] 吴炜,吴长风,张翠霞,等. 基于虚拟迭代的承载式客车车 身疲劳分析[J]. 机械设计, 2023, 40(9):94-98.
- [5] 龚智伟,黄伟,赖志坚,等.基于循环工况的客车骨架疲劳
 寿命分析和优化[J].机械设计与制造,2021(11):172-176.
- [6] 黄妮,冯燕,戴作强,等. 氢燃料电池客车车架多工况疲劳 可靠性分析[J]. 机械制造与自动化,2019,48(5):17-21.
- [7] HOBBACHER F A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2016:1-100.
- [8] 官勇健,龚春辉,王祖建,等.某乘用车稳定杆支座台架耐 久试验载荷谱编制[J].汽车实用技术,2022,47(19):98-103.
- [9] 袁盛铭,吴兴文,赵明花,等.随机振动疲劳寿命评估频域 法模型适用性研究[J].噪声与振动控制,2023,43(2):28
 -34.
- [10] 陆明万,寿比南,杨国义.疲劳分析中变幅载荷的循环计数方法[J]. 压力容器, 2012,29(11):25-29.