

基于主 $S-N$ 曲线法的地铁车体 焊缝疲劳分析

岳译新¹, 刘永强¹, 李晓峰²(1. 南车株洲电力机车有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001;
2. 大连交通大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116028)

作者简介: 岳译新(1981-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事城轨车体结构设计和有限元分析。

摘 要: 建立了包括焊缝在内的某 B 型地铁铝合金车体的有限元模型, 采用美国 ASME 标准中“网格不敏感的结构应力法及主 $S-N$ 曲线法”, 对车体焊缝进行了有限元分析, 分析计算了焊缝上的应力集中以及焊缝的疲劳寿命与损伤。计算结果表明, 所有焊缝的疲劳寿命均达到了车体的设计寿命要求。

关键词: 铝合金车体; 主 $S-N$ 曲线法; 结构应力; 焊缝疲劳; ASME 标准

中图分类号: TG405; U266.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)05-0079-03

Weld Line Fatigue Analysis of Metro Carbody Based on Master $S-N$ Curve Method

YUE Yi-xin¹, LIU Yong-qiang¹, LI Xiao-feng²(1. Technology Center, CSR Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. Traffic & Transportation School, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China)

Abstract: FEA model of a B-type metro aluminum alloy carbody including weld line was established. Based on the mesh-insensitive structural stress method and main $S-N$ curve method in ASME standard, stress concentration, fatigue life and damage were calculated for each key weld line. The results showed that the fatigue life of all weld line had reached the carbody design life.

Key words: aluminum alloy carbody; main $S-N$ curve method; structural stress; weld line fatigue; ASME standard

0 引言

轨道车辆焊接结构可靠性设计的重要指标之一是其疲劳寿命, 在复杂的动载荷作用下, 疲劳破坏主要从焊缝开始。对于焊接结构, 由于焊接接头部位存在较大的应力集中, 且常伴随有各种焊接缺陷, 因而是最容易发生疲劳破坏的区域。因此, 各焊接接头的疲劳强度将直接决定整个焊接结构的使用是否安全。焊接结构疲劳寿命的评定主要是针对焊接接头的疲劳强度评定。目前各种疲劳设计规范中, 基于名义应力的焊接接头及构件的疲劳强度评定是主要的评定方法。名义应力法使用简便, 但是必须依据焊接接头几何形状和受力状态分类, 而且对于复杂的接头存在无法确定其类别或名义应力; 另外 IIW 给出了几条基于热点应力(或称之为几何应力) $S-N$ 曲线数据, 为了获得应力集中, 它要么通过 2 个或 2 个以上的名义应力向焊趾处外推, 要么通过焊趾处网格细化, 例如在焊趾处利

用子结构技术实现网格细化, 由于其计算量大, 其工程应用的局限性同样不可避免。

主 $S-N$ 曲线法是 Pingsha Dong 博士基于力学基本原理及大量焊接疲劳试验而发明的计算焊缝疲劳寿命的最新方法。该方法采用了“网格不敏感的结构应力计算方法及主 $S-N$ 曲线法”, 可以相对准确地计算出空间任意走向的焊缝的疲劳寿命, 很好地解决了名义应力法所遇到的上述困难。2007 年, 美国 ASME 将其列为焊接结构焊缝疲劳寿命计算标准, 2009 年, 欧洲亦将其列为计算标准。

1 主 $S-N$ 曲线法

由于焊接结构疲劳裂纹客观存在的特殊性, 从力学机理上看, 它的裂纹扩展过程仅是与材料性能无关的一个纯力学行为, 因此, 其疲劳寿命就可以应用断裂力学的理论求解。该方法将焊缝焊趾上的应力分解成 2 部分: 一是焊接工艺过程导致的非线性自平衡应力, 二是与外力平衡的结构应力。它可通过一组应变片外推插

收稿日期: 2011-12-22

值间接获得,亦可以用适当的有限元获得。基于有限元法,利用焊缝上的节点力一定与外力平衡的条件求得结构应力。基于两阶段裂纹扩展模式及断裂力学表达式,积分获得了一个新的定义:“等效结构应力”。在这个基于断裂力学表达式的等效结构应力计算公式(2)中,不仅考虑了焊接接头板的厚度影响、载荷模式影响,也考虑了应力集中的影响。以等效结构应力变化范围 ΔS_s 为参数的主 $S-N$ 曲线的焊缝疲劳寿命计算公式如下:

$$N = \left(\frac{C}{\Delta S_s} \right)^{\frac{1}{h}} \quad (1)$$

其中,等效结构应力的计算公式为

$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{(2-m)/2m} \cdot I(r)^{1/m}} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $\Delta \sigma_s$ 为结构应力变化范围; t 为实际板厚与单位板厚之比; $I(r)$ 为描述载荷模式效应的函数,其中 r 为弯曲比; $m=3.6$; C 及 h 为主 $S-N$ 曲线试验常数; N 为循环次数。不难看出,新定义的主 $S-N$ 曲线方程与BS等标准中基于名义应力的 $S-N$ 曲线方程形式上是相同的,但是,主 $S-N$ 曲线方程中用变化范围度量的等效结构应力并不是针对某一个具体的焊接接头而提出的,它将反映应力集中的结构应力、焊接接头的板厚度、外载荷引起的膜应力与弯曲应力的比例进行了综合,因而对任何走向的焊缝都有效。

2 车体焊缝疲劳寿命预测

建立了某B型地铁铝合金车体有限元模型,节点总数为629 844,单元总数为803 746,车体有限元模型如图1所示。

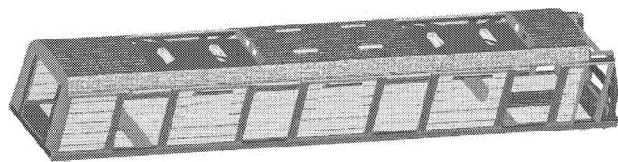


图1 车体有限元模型

地铁车辆在运行过程中受力复杂,比如线路的不平顺,频繁地上下乘客等作用力会引起车辆横向和垂向的振动;地铁站台间距小,车辆频繁的牵引、制动会引起车辆纵向的振动。有振动就有振动加速度。反之,如能获得车辆3个方向的振动加速度,就可以得出车辆的振动情况。不同路段不同时间的乘客数量不同,因此车辆运营载荷从整备状态(AW0)到超载状态(AW3)之间是不断变化的,计算中,载荷取最大值AW3。振动加速度的获得有2种方式:①在线路上实际进行动应力测试;②采用经验数据。由于没有线路实测数据,本文采用经验数据。根据“EN 12663-1:2010”标准中的表16、表17和表18中给定的车体振动加速度,垂向振动加速度取 $(1 \pm 0.15)g$;横向、纵向振动加速度取 $\pm 0.15g$,即垂向

载荷 $AW3 \times (1 \pm 0.15)g$,横向载荷 $AW3 \times (1 \pm 0.15)g$,纵向载荷 $AW3 \times (1 \pm 0.15)g$ 。

基于ANSYS软件,在3种疲劳载荷工况的作用下,对车体进行静强度分析。基于车体有限元分析结果,对40条主要焊缝进行了疲劳寿命评估,在此只列出了12条比较典型的焊缝,它们的详细焊缝位置说明见表1。

表1 12条典型的焊缝位置说明

枕梁型材与底架边梁的连接焊缝 1
长地板加强筋与地板的连接焊缝
司机室门立柱与司机室门门槛的焊缝 1
司机室门立柱与司机室门门槛的焊缝 2
长地板连接型材与长地板连接焊缝
客室门立柱与底架边梁的连接焊缝
枕梁型材与底架边梁的连接焊缝 2
二位端缓冲梁立板与缓冲梁盖板焊缝 1
二位端缓冲梁立板与缓冲梁盖板焊缝 2
二位端缓冲梁盖板之间的焊缝
二位端牵引梁型材与牵引梁立板的焊缝
二位端缓冲梁盖板与枕梁型材之间的焊缝

3 焊缝疲劳寿命预测

根据疲劳工况有限元分析结果,提取节点力,然后计算各焊缝结构应力。以第7条焊缝为例进行说明,其结构应力沿着定义好的焊缝走向上的分布曲线见图2。在图3~图5中,给出了3种疲劳工况下该条焊缝的应力集中情况,图上的横坐标是从评估焊缝的焊线起点到焊线终点,其值与焊缝上节点位置相对应,单位为mm,纵坐标为应力分布情况,单位为MPa。

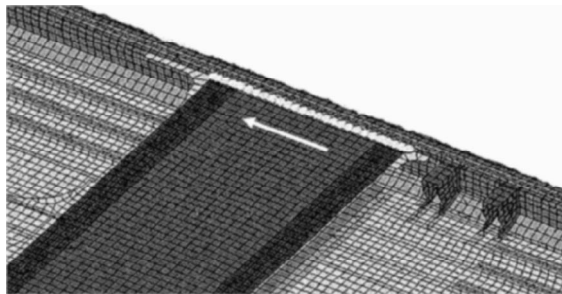


图2 焊缝位置

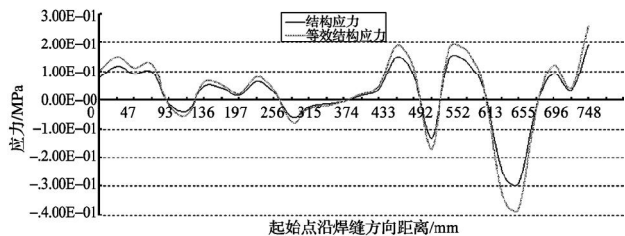


图3 疲劳工况1的焊缝应力分布

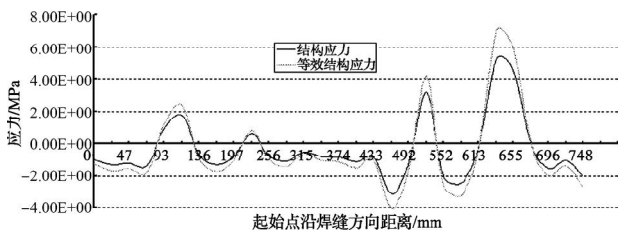


图4 疲劳工况2的焊缝应力分布

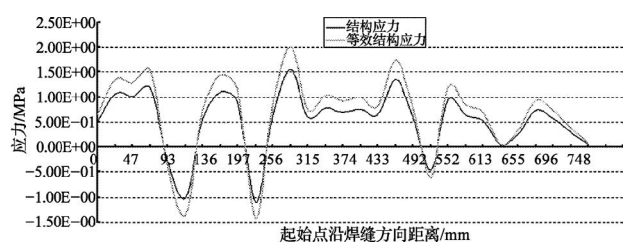


图 5 疲劳工况 3 的焊缝应力分布

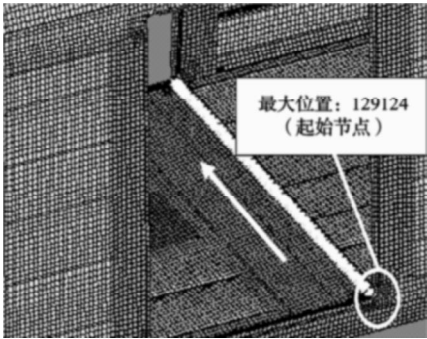


图 6 第 5 条焊缝最大损伤值发生位置

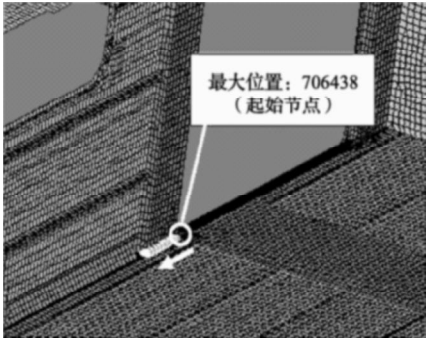


图 7 第 6 条焊缝最大损伤值发生位置

依据 3 种载荷工况的车体各焊缝等效结构应力, 选用 98% 可靠度的主 S-N 曲线, 计算出各工况下、各焊缝达到破坏时的应力循环次数, 然后, 计算各工况焊缝的损伤。

根据 Miner 线性损伤理论, 材料的疲劳破坏是由循环载荷的不断作用而产生损伤并不断积累造成的, 疲劳损伤累积达到破坏时吸收的净功 W 与疲劳载荷的历史无关, 并且材料的疲劳损伤程度与应力循环次数成正比。设材料在某级应力下达到破坏时的应力循环次数为 N_i , 经 n_i 次应力循环而疲劳损伤吸收的净功为 W_i , 根据 Miner 理论有

$$\frac{W_i}{W} = \frac{n_i}{N_i} \tag{3}$$

对 m 级加载情况, 材料疲劳累积损伤可表示为

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_m}{N_m} = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (i=1, 2, \dots, m) \tag{4}$$

式 (3) 和式 (4) 中, n_i 表示第 i 级应力水平下经过的应力循环数; N_i 表示第 i 级应力水平下的达到破坏时的应力循环数; D 为累积损伤。当 D 值等于 1 时, 即认为被评估对象开始产生疲劳破坏。表 2 为各工况下车体焊缝的总的循环次数和总损伤值。由表 2 可知, 最大的损伤值为 $2.43\text{E-}02$, 小于 1, 即被评估的所有焊缝均满足疲劳寿命的设计要求。其中寿命相对薄弱部位是长地板连接型材与长地板连接焊缝 (焊缝 5) 和客室门立柱与底架边梁的连接焊缝 (焊缝 6), 对应累计损伤分别为 $7.87\text{E-}02$ 、 $2.43\text{E-}02$, 具体位置见图 6 和图 7。在对应的施工图纸上, 对该处焊缝提高检验等级, 尤其是焊接起弧的地方, 以减少焊接缺陷, 达到提高焊缝寿命的效果。

表 2 各工况下车体焊缝的总的循环次数和总损伤值

位置名称	节点号	寿命 (次数)	损伤值
枕梁型材与底架边梁的连接焊缝 1	705661	3.13E+09	4.27E-03
长地板加强筋与地板的连接焊缝	705896	2.05E+14	6.42E-03
司机室门立柱与司机室门门槛的焊缝 1	653174	2.97E+09	4.28E-03
司机室门立柱与司机室门门槛的焊缝 2	699542	2.65E+09	3.88E-03
长地板连接型材与长地板连接焊缝	129124	1.50E+08	7.87E-02
客室门立柱与底架边梁的连接焊缝	706438	4.24E+08	2.43E-02
枕梁型材与底架边梁的连接焊缝 2	120646	2.11E+10	4.73E-04
二位端缓冲梁立板与缓冲梁盖板焊缝 1	707318	1.96E+11	5.24E-05
二位端缓冲梁立板与缓冲梁盖板焊缝 2	707141	2.92E+11	3.57E-05
二位端缓冲梁盖板之间的焊缝	418878	2.34E+12	5.92E-06
二位端牵引梁型材与牵引梁立板的焊缝	707469	9.80E+11	1.03E-05
二位端缓冲梁盖板与枕梁型材之间的焊缝	417348	9.52E+10	1.42E-04

4 结语

根据计算结果: 在 3 种疲劳载荷工况 (取自 EN 12663-1: 2010 标准) 的作用下, 所评估的所有焊缝的累积损伤均小于 1, 满足疲劳寿命的使用要求。其中寿命相对薄弱部位是长地板连接型材与长地板连接焊缝 (第 5 条焊缝) 和客室门立柱与底架边梁的连接焊缝 (第 6 条焊缝), 对应的累计损伤分别为 $7.87\text{E-}02$ 、 $2.43\text{E-}02$ 。

基于主 S-N 曲线法: 不论焊接结构多么复杂, 也不论焊缝如何走向, 当给定静载荷时, 设计人员可以评估焊缝上的应力集中; 当给定动载荷时, 设计人员可以评估焊缝上的疲劳寿命。通过该方法, 设计人员可及时发现疲劳寿命达不到设计要求或疲劳寿命相对较短的焊缝。

疲劳破坏现象的实质就是应力集中过于严重所导致的结果。因此, 在结构设计过程中, 千方百计地降低各式各样的应力集中是提高其抗疲劳能力的第一要素。

参考文献:

[1] 武奇, 邱慧清, 王伟生. 基于结构应力的焊接接头疲劳分析 [J]. 焊接学报, 2009, 32(4): 101-106.

[2] IIW Joint Working Group XIII-1539-96/XV-845-96, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components [S]. IIW / IIS, 2003.

[3] API 579-1/ASME FFS-1, The ASME B&PV Code, Section VIII, Division 2 [S]. 2007.

[4] EN12663-1, Railway applications-structural requirements of railway vehicle bodies [S].

[5] 梁树林, 聂春戈, 王悦东, 等. 焊缝疲劳寿命预测新方法及其在焊接构架上的应用 [J]. 大连交通大学学报, 2010, 31(6): 29-34.

[6] 李向伟, 兆文忠. 基于 Verity 方法的焊缝疲劳评估原理及验证 [J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 9-13.