

# 不锈钢车体激光焊连接的模拟方法及强度评估

谢素明<sup>1</sup>, 李秉鑫<sup>1</sup>, 薛宁鑫<sup>2</sup>, 李娅娜<sup>1</sup>

(1. 大连交通大学 机车车辆工程学院, 辽宁 大连 116028; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司 国家轨道客车工程研发中心, 吉林 长春 130062)

**摘要:**采用有限元分析方法研究不锈钢车体侧墙激光焊连接的模拟方法与强度分析问题。首先,分别建立实体单元、薄壳单元及梁单元模拟半熔透搭接激光焊连接强度的分析模型,以及梁单元模拟不同焊缝长度的分析模型,并在相同计算条件下,通过对比分析确定了适用于复杂结构激光焊连接强度分析的焊缝单元类型;其次,基于 GB/T 37778—2019 和接头疲劳试验数据及不同焊缝长度模型的分析结果,总结适用于复杂结构激光焊连接静强度与疲劳强度的评估方法;再次,建立某弧焊-点焊-激光焊的不锈钢车体结构强度分析模型;最后,在 EN 12663-1:2010+A1:2014 规定的静态与动态载荷工况作用下,分析不锈钢车体侧墙激光焊连接强度。结果表明:AW3 状态车钩压缩工况的车体侧墙中部上边梁区域的激光焊梁单元的最小安全系数为 1.03;车体侧墙激光焊区域的梁单元的计算剪应力变化范围均远低于  $10^6$  次和  $10^7$  次的疲劳强度值,侧墙激光焊连接疲劳强度冗余大。

**关键词:**不锈钢车体;激光焊;梁单元;强度分析

**文献标识码:**A **DOI:**10.13291/j.cnki.djdxac.2024.01.006

因为不锈钢车体侧墙薄壁部件的连接焊点较多,致使这些部件焊接变形大,车体外观质量常常无法保证,所以车体侧墙部件连接方式开始由焊接热影响区小、焊接变形小的激光焊连接取代<sup>[1]</sup>。车体结构激光焊连接的模拟方法与强度评估方法已成为不锈钢车体结构强度设计的重点内容。

在不锈钢结构的激光焊连接研究方面,逯世杰等<sup>[2]</sup>以 SUS304 不锈钢焊接接头为研究对象,比较激光焊与 MIG 焊导致的焊接变形与残余应力的差异。结果表明:采用激光焊时,焊接变形减小约 75%,残余应力减小 50% 以上。许柏涛<sup>[3]</sup>研究了竖焊缝式激光焊的拉伸强度和疲劳强度预测,通过对不同板厚的激光焊接头进行组合,得到板厚对接头疲劳性能和断裂机制的影响。束洋<sup>[4]</sup>提出了适用于车体侧墙的激光段焊结构,并使用 Abaqus 软件建立不同焊缝长度和焊缝间距的侧墙结构模型,探究激光段焊结构性能的影响参数。

本文通过分析各种单元模拟半熔透搭接激光

焊焊缝模型的计算结果,研究适合复杂焊接结构激光焊缝的单元类型。通过分析激光焊不同长度焊缝分析模型的焊缝单元应力结果,对照 GB/T 37778—2019<sup>[5]</sup> 及疲劳试验结果,总结出适用于任意长度的焊缝强度评估方法。在此基础上,利用 EN 12663-1:2010+A1:2014<sup>[6]</sup> 中的载荷,研究不锈钢车体侧墙激光焊的连接强度。

## 1 模拟方法与强度评估

本文采用实体单元、薄壳单元以及梁单元分别模拟激光焊搭接焊缝,通过焊缝单元剪应力与理论计算值误差的对比分析,确定适用于不锈钢车体激光焊连接的单元类型;借助 GB/T 37778—2019 和不同焊缝长度的激光焊搭接接头的强度分析模型及试验数据,确定适用于不锈钢车体激光焊焊缝的模拟单元分布形式和连接强度的评估方法。

### 1.1 激光焊连接的模拟方法

半熔透激光焊搭接焊缝示意图见图 1。组合板

收稿日期:2022-12-20

基金项目:国家高速列车技术创新中心研发计划项目(CXKY-02-01-01(2020))

第一作者:谢素明(1965—),女,教授。E-mail:sumingxie@163.com

通信作者:李秉鑫(1996—),男,硕士研究生。E-mail:1765624405@qq.com

厚度为 0.8 mm+2 mm,半熔透激光焊搭接焊缝的板材料为 SUS301L-DLT,抗拉强度为 690 MPa,屈服强度为 345 MPa。依据 GB/T 37778—2019 确定焊缝长度为 30 mm,承受拉伸力  $F_s$  为 2.8 kN。

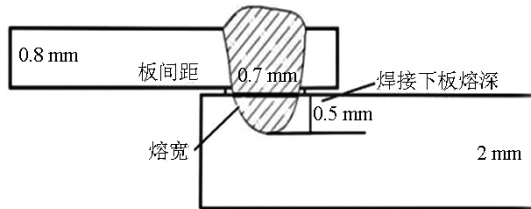


图 1 半熔透激光焊搭接焊缝示意图

分别采用实体单元、薄壳单元以及梁单元模拟搭接焊缝,建立激光焊搭接焊缝强度分析模型,并在相同计算条件下进行对比分析,接头分析模型的细节见表 1。

表 1 激光焊接头的不同分析模型

模拟单元	有限元模型	焊缝细节图	载荷及约束
连接件和焊缝离散为实体单元			在 0.8 mm 板端部施加拉伸载荷 2.8 kN;
连接件和焊缝离散为薄壳单元			在 2 mm 板端部施加全约束;
连接件离散为薄壳单元,焊缝离散为梁单元			在 0.8 mm 板端部施加除拉伸方向的全约束

根据材料力学剪应力公式  $\tau = F_s/A$ , 可得焊缝  $\tau$  为 133.33 MPa,其中焊缝面积  $A = \text{熔宽} \times \text{焊缝长度}$ 。不同分析模型中焊缝单元的剪应力见图 2。

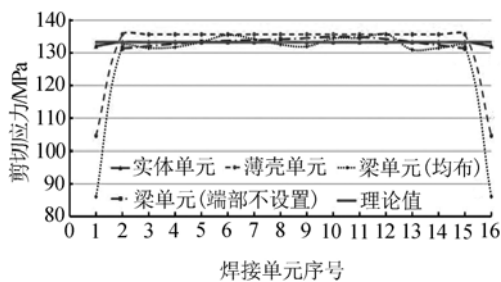


图 2 不同分析模型中焊缝单元的剪应力

由图 2 可以看出:焊缝实体单元、梁单元(不含焊缝端部单元)、薄壳单元(除端部单元)的剪应力均与理论值很接近,实体单元和梁单元的误

差均在 1% 以内、薄壳单元的误差为 1.41%。显然,3 种单元均可模拟激光焊缝。然而,不锈钢车体侧墙的激光焊缝长度达数米,同时侧墙部件厚度仅为几毫米,当采用实体单元和薄壳单元模拟激光焊缝时,考虑到单元尺寸的合理匹配,车体强度分析模型规模巨大,常常无法计算。因此,建立不锈钢车体强度分析模型时,应采用梁单元模拟激光焊连接关系。

### 1.2 激光焊连接的静强度评估

GB/T 37778—2019 中仅给出了焊缝长为 30 mm、母材抗拉强度为 520~1 080 MPa 的激光焊搭接接头的拉伸剪切力,如表 2 所示。当连接件板厚不同时,如 0.8 mm 和 2 mm,应依据较小板厚选择剪切力数值,如 2.8 kN;当连接件板厚在表 2 中找不到对应数值时,如 1.25 mm,可对板厚 1.0 mm 和 1.5 mm 对应的剪切力数值进行插值获得。

表 2 不同板厚搭接接头的拉伸剪切力

板厚/ mm	拉伸剪切力/kN		
	$520 \leq R_m \leq 760$	$760 \leq R_m \leq 910$	$910 \leq R_m \leq 1\ 080$
0.6	1.9	3.6	3.3
0.8	2.8	3.9	5.0
1.0	3.9	5.3	6.8
1.5	6.9	9.5	12.0
2.0	10.4	14.2	18.1
3.0	18.2	25.1	31.9
4.0	27.3	37.5	47.8
5.0	37.3	51.3	65.3

为研究如何利用表 2 对不锈钢车体侧墙激光焊长焊缝连接强度进行评估,本文分别建立焊缝长度为 30、60、90 mm 的激光焊搭接接头的强度分析模型,采用梁单元模拟激光焊连接且每种焊缝长度均采用 4 种梁单元分布形式。梁单元面积可由熔宽  $\times$  焊缝长度与梁单元数量的比值确定,焊缝长度为 30、60、90 mm 的分析模型的拉伸力分别为 2.8、5.6、8.4 kN。

将分析模型计算得到的焊缝单元剪应力与公式计算的理论数值进行对比,结果见图 3。从图 3(a)可以看出:焊缝长为 30 mm 时,焊缝分 3 段 2 个梁单元和 4 段 3 个梁单元模拟且单元间距为 15 mm 的剪应力与理论值的误差最小,误差不超过 2%,其他分布形式的分析模型的误差均较大。从图 3(b)可以看出:焊缝长为 60 mm 时,焊缝分 5 段 4

个梁单元模拟且单元间距为 15 mm 的剪应力与理论值的误差最小,误差不超过 2%,其他分布形式的分析模型的误差也均较大。从图 3(c)可以看出:焊缝长为 90 mm 时,焊缝分 7 段 6 个梁单元模拟且单元间距为 15 mm 的剪应力与理论值的误差最小,不超过 2%。中部单元的剪应力大于理论值,端部单元的剪应力小于理论值,其他分布形式的分析模型的误差均较大。

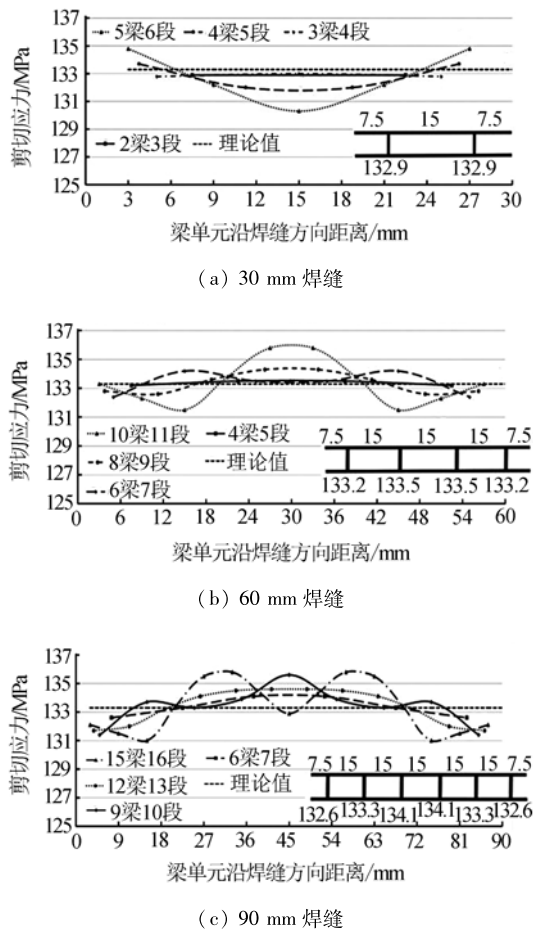


图3 不同分析模型中焊缝单元的剪应力

根据上述分析将不锈钢车体侧墙激光焊长焊缝模拟和连接强度分析的过程总结如下:

(1) 激光焊梁单元数量由焊缝长度除以 15 mm 并经圆整后决定。梁单元面积由熔宽、焊缝长度及梁单元的数量决定。实际应用时,在距离焊缝端部 7.5 mm 处布置 1 个梁单元(每端),然后间隔 15 mm 均布其他梁单元。

(2) 提取静载荷作用下激光焊梁单元的剪切力  $F_y$  和  $F_x$ (梁单元轴向为  $x$ ) 并利用公式  $S_{\text{合}} = \sqrt{F_y^2 + F_x^2}$  合成剪切力,进而获得梁单元的剪应力。

(3) 利用表 1 和焊缝长度除以 30 mm 的商

值,确定焊缝的总剪切力,将总剪切力除以熔宽和焊缝长度,获得焊缝的许用剪应力。

(4) 位于非端部梁单元的剪应力应小于焊缝的许用剪应力,当位于端部区域的应小于许用剪应力的 0.95 倍时,认为符合强度设计要求。

若侧墙激光焊梁单元的计算剪应力不满足(4),则需对焊件结构进行改进设计。

### 1.3 激光焊连接的疲劳强度评估

断裂力学法和试验法是激光焊连接疲劳特性研究常用的方法,前者是基于裂纹扩展速率的 Paris 定律,从焊缝初始裂纹到临界裂纹进行积分,获得裂纹的扩展寿命。若疲劳寿命大于要求的疲劳寿命则初始缺陷可以接受,反之不可<sup>[7]</sup>。后者是在疲劳载荷作用下对激光焊连接试样进行疲劳试验,获得指定循环次数下试样所能承受的最大疲劳载荷。利用断裂力学法研究不锈钢车体激光焊连接疲劳强度问题,分析模型不仅复杂且规模超大,通常无法实现。因此,复杂结构疲劳分析时优先考虑试验法。

基于试验法评估不锈钢车体激光焊连接疲劳强度的基本过程如下:

(1) 对激光焊连接部件进行疲劳试验,依据 GB/T 24176—2009<sup>[8]</sup> 分析在不同应力水平下,利用线性关系在合适的坐标系下估计指定疲劳寿命下的疲劳强度值。

例如:侧墙激光焊部件组合板厚为 1.5 mm + 2 mm 的试件的半熔透激光焊缝的长度为 30 mm,熔宽为 0.7 mm。对激光焊试件疲劳试验数据进行统计分析,在单对数坐标系下,基于最小二乘法对疲劳试验数据进行线性拟合,存活率为 97.5% 和 50% 的 S-N 曲线如图 4 所示。

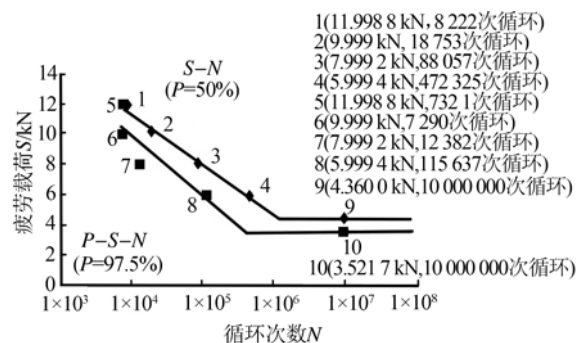


图4 组合板厚 1.5 mm+2 mm 的 P-S-N 曲线

由图 4 可得:组合板厚 1.5 mm+2 mm 的寿命次数为  $10^6$  次和  $10^7$  次的、存活率为 97.5% 的、30 mm 焊缝的疲劳载荷均为 3.52 kN。

(2)由车体激光焊部件的组合板厚 1.5 mm+2 mm 的焊缝长度除以 30 mm 的商值和同一组合板厚的焊缝长度为 30 mm 的指定疲劳寿命下的疲劳载荷值,确定车体激光焊焊缝的总剪切力;再将总剪切力除以熔宽和焊缝长度获得焊缝在指定疲劳寿命下的疲劳强度值。

(3)提取疲劳载荷工况作用下的车体侧墙激光焊各种组合板厚的焊缝每梁单元的剪切力变化,并计算出合成剪切力变化,进而计算出每梁单元的剪应力变化。

(4)位于焊缝中部每梁单元的计算剪应力变化小于焊缝在指定疲劳寿命下的疲劳强度值视为合格;位于端部区域梁单元的计算剪应力变化小于指定疲劳寿命下的疲劳强度值的 0.95 倍视为合格。

## 2 不锈钢车体有限元模型

不锈钢车体底架、车顶及端墙部件的主要连接方式为弧焊和点焊,为了结构轻量化及外形的美观,大量采用薄板冲压形成的帽形梁作为侧墙承载结构,这些梁与车体蒙皮的搭接为非熔透激光焊连接。

某不锈钢车体侧墙的横梁与蒙皮材料均为 SUS301L-DLT, 部件连接为激光焊,焊缝平均熔宽为 0.7 mm,组合板厚为 0.8 mm+2 mm 和 1.5 mm+2 mm。按组合板厚和激光焊缝长度,侧墙激光焊可分为 13 种。依据第二节确定的焊缝单元模拟方法,侧墙激光焊及模拟单元的相关参数见图 5 和表 3。

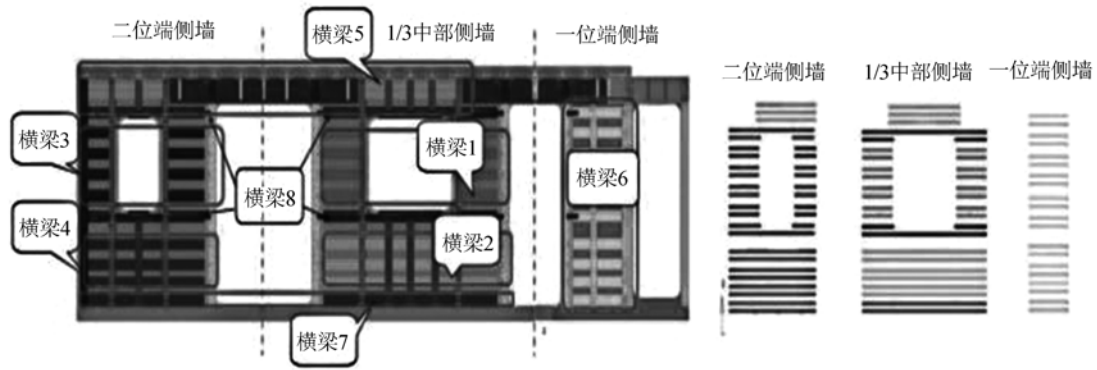


图 5 侧墙激光焊连接示意与分布

表 3 车体侧墙激光焊及模拟单元的相关参数

序号	连接件 1	厚度/mm	连接件 2	厚度/mm	焊线长度/mm	焊点数量(间距/mm)	总剪切力/kN
1	横梁 1	0.8	蒙皮	2	640	40(16)	59.73
2	横梁 2	0.8	蒙皮	2	2 694	175(15.4)	251.44
3	横梁 3	0.8	蒙皮	2	469	31(15.1)	43.77
4	横梁 4	0.8	蒙皮	2	1 871	117(16)	174.63
5	横梁 5	0.8	蒙皮	2	1 550	94(16.5)	144.67
6	横梁 5	0.8	蒙皮	2	1 297	81(16)	121.05
7	横梁 6	0.8	蒙皮	2	784	49(16)	73.17
8	横梁 7	1.5	蒙皮	2	1 871	117(16)	430.33
9	横梁 7	1.5	蒙皮	2	2 694	175(15.4)	619.62
10	横梁 8	1.5	蒙皮	2	683	44(15.5)	157.09
11	横梁 8	1.5	蒙皮	2	1 833.3	119(15.4)	421.65
12	横梁 8	1.5	蒙皮	2	684.7	44(15.5)	157.48
13	横梁 8	1.5	蒙皮	2	468.5	31(15.1)	107.76

由于侧墙中部结构的形状尺寸相同,图 5 中仅描述一位端、二位端以及 1/3 中部侧墙结构。表 3 的最后一列为由表 1 和焊缝长度除以 30 mm

的商值确定的焊缝总剪切力。

不锈钢车体结构离散为四节点薄壳单元,有限元模型见图 6。模型中单元总数为 3 507 038,

节点总数为 2 576 233, 高压箱、逆变器、蓄电池箱及空调机组等设备以集中质量点与柔性单元结合的形式施加在安装位置, 乘客重量以质量点形式均布在底架地板上。车体整备 AW0 质量为 21. 953 t, 定员状态 AW2 质量为 36. 093 t, 超员状态 AW3 质量为 38. 403 t, 模拟激光焊缝的梁单元总数为 23 207。

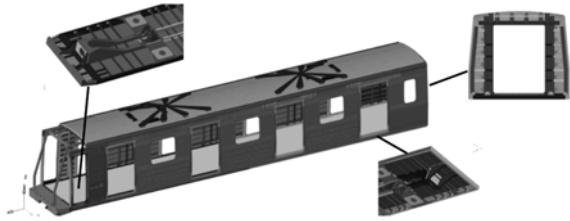


图6 车体及部件有限元模型

### 3 不锈钢车体激光焊连接强度分析

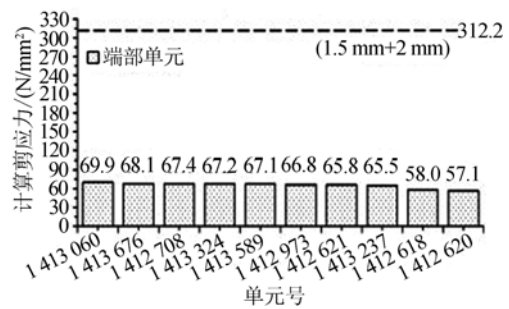
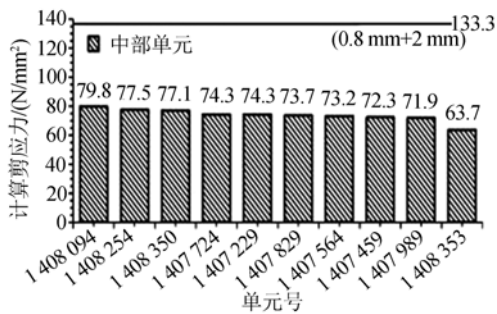
本文采用激光焊焊缝模拟方式与评估方法,

在静态与动态载荷工况下, 对不锈钢车体侧墙激光焊连接强度进行分析与评价。

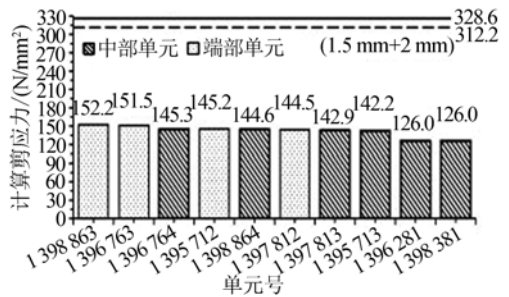
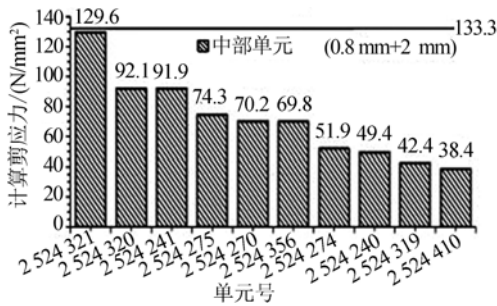
#### 3.1 静强度分析

依据 EN 12663-1:2010+A1:2014, 车体承受的静态载荷主要包括: 垂向、端压、车钩拉伸与压缩以及设备冲击等, 由这些载荷组合成多个静强度计算工况。经车体静强度分析, 1. 3 倍垂向超员载荷工况、AW3 状态车体的车钩压缩 800 kN 工况以及 AW3 状态车体的车钩拉伸 600 kN 工况的车体侧墙激光焊梁单元的应力相对较大。

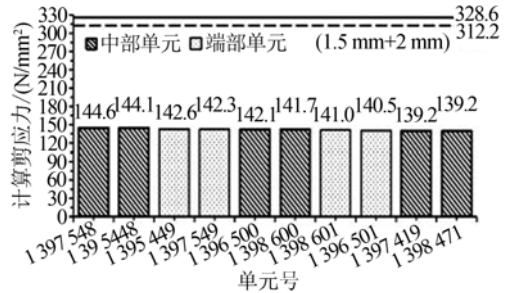
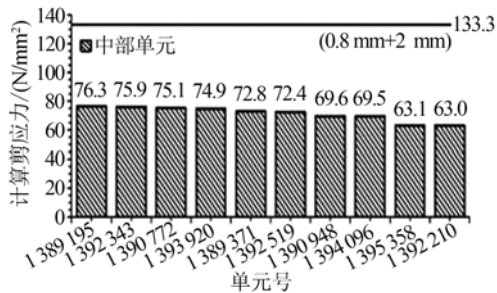
这 3 个工况下侧墙组合板厚 0. 8 mm+2 mm 和 1. 5 mm+2 mm 的前 10 个模拟激光焊梁单元的计算剪应力见图 7。利用 2. 2 节的总结(3)和(4)及表 3 可得, 组合板厚为 0. 8 mm+2 mm 的位于中部与端部区域的梁单元许用剪应力分别为 133. 3 和 126. 6 N/mm<sup>2</sup>, 组合板厚为 1. 5 mm+2 mm 的许用剪应力分别为 328. 6 和 312. 2 N/mm<sup>2</sup>。



(a) 1.3 倍垂向超员载荷工况



(b) AW3 状态车钩压缩工况



(c) AW3 状态车钩拉伸工况

图7 静载荷下模拟激光焊梁单元的计算剪应力

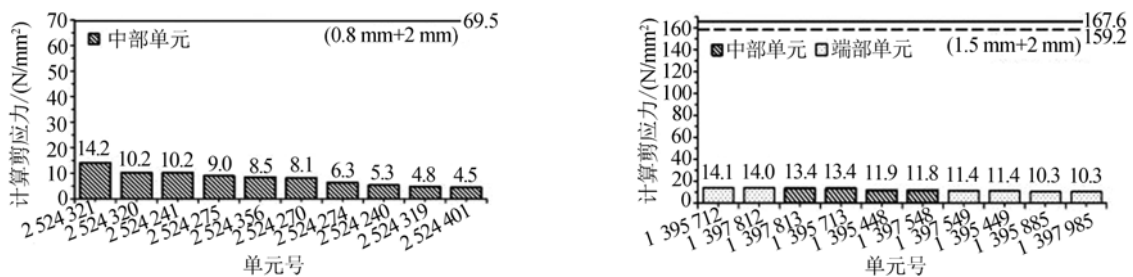
由图 7 可知:AW3 状态车钩压缩工况下,位于侧墙 5 号梁中部(图 5 中上边梁区域)的激光焊梁单元的计算剪应力为  $129.6 \text{ N/mm}^2$ ,安全系数最小,值为 1.03;1.3 倍垂向超员载荷工况和 AW3 状态车钩拉伸工况的前 10 个模拟激光焊的梁单元的计算剪应力很接近。此外,侧墙其他区域梁单元的计算剪应力均远低于其许用值。

### 3.2 疲劳强度分析

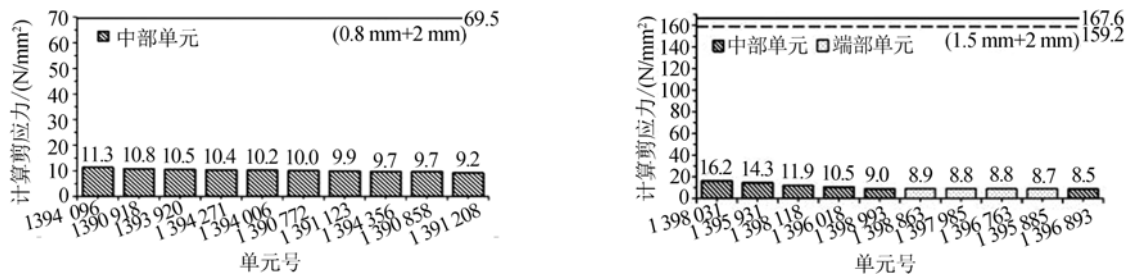
依据 EN 12663-1:2010+A1:2014 车体承受的疲劳工况为:定员状态下车辆承受的纵向振动加速度变化为  $\pm 0.15g$ 、横向振动加速度变

化为  $\pm 0.15g$ 、垂向振动加速度变化为  $\pm 0.15g$ ,循环次数为  $10^7$ 。考虑到车体实际运用情况,车体还应承受整备重量至定员重量(模拟乘客上下车重量变化情况)的突变,循环次数为  $10^6$  次。

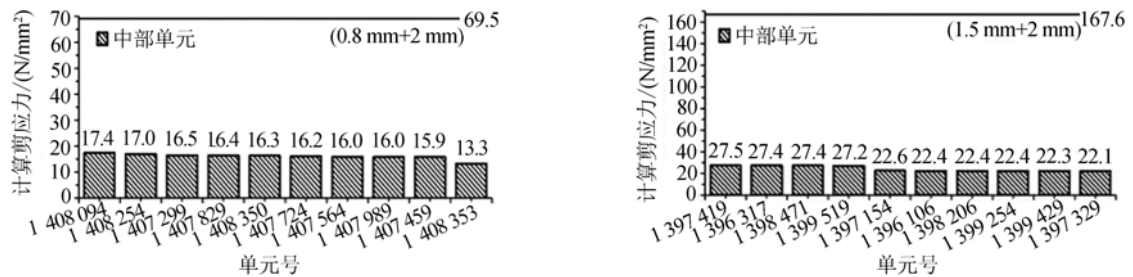
在上述疲劳工况作用下,车体侧墙 2 种组合板厚的前 10 个激光焊梁单元的计算剪应力变化范围见图 8。利用 2.3 节的总结(2)和(4)及试验结果可得:组合板厚为  $0.8 \text{ mm}+2 \text{ mm}$  的中部与端部梁单元的  $10^6$  次和  $10^7$  次的疲劳强度值分别为  $69.5$  和  $66.0 \text{ N/mm}^2$ ,组合板厚为  $1.5 \text{ mm}+2 \text{ mm}$  的分别为  $167.6$  和  $159.2 \text{ N/mm}^2$ 。



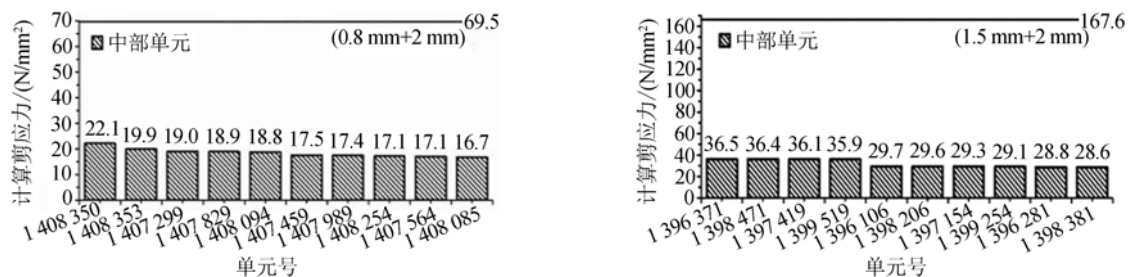
(a) 纵向振动工况



(b) 横向振动工况



(c) 垂向振动工况



(d) 上下车工况

图 8 模拟激光焊梁单元的计算剪应力变化

由图8可知:垂向振动工况和上下车工况的前10个模拟激光焊梁单元的计算剪应力变化范围很接近,大于其他疲劳工况的计算结果。在疲劳载荷工况作用下,车体侧墙激光焊区域的梁单元的计算剪应力变化范围均远低于 $10^6$ 次和 $10^7$ 次的疲劳强度值,这意味着侧墙激光焊连接疲劳强度冗余大。

## 4 结论

(1)相比于薄壳单元和实体单元,梁单元更适合模拟不锈钢车体侧墙激光焊的连接关系。激光焊梁单元的布置:距离焊缝端部7.5 mm处布置1个梁单元(每端),其他梁单元的间距为15 mm左右。梁单元面积由熔宽、焊缝长度及梁单元数量决定。

(2)本文基于GB/T 37778—2019接头疲劳试验数据及不同焊缝长度模型的分析结果,总结出复杂结构激光焊连接静强度可使用标准中推荐的剪切力值进行评估;可使用疲劳试验数据获得 $10^6$ 次和 $10^7$ 次的、存活率为97.5%的、30 mm焊缝的疲劳载荷,对复杂结构激光焊疲劳强度进行评估。

(3)AW3状态车钩压缩工况下,车体侧墙中部上边梁区域的激光焊梁单元的最小安全系数为1.03;其他工况的模拟侧墙激光焊梁单元的计算

剪应力均远低于其许用值。

(4)在疲劳载荷工况下,车体侧墙激光焊区域的梁单元的计算剪应力变化范围均远低于 $10^6$ 次和 $10^7$ 次的疲劳强度值。

## 参考文献:

- [1]孙朝,许世涛,雷文,等. SUS301L 不锈钢激光焊研究现状[J]. 焊接技术, 2020, 49(1): 1-7.
- [2]逯世杰,郑颖,王虎,等. SUS304 不锈钢薄板激光焊与惰性气体保护焊的焊接变形和残余应力的比较[J]. 激光杂志, 2019, 40(11): 144-149.
- [3]许柏涛. 竖焊缝式熔透激光焊接接头疲劳性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [4]束洋. 不锈钢车体侧墙激光焊缝排布及疲劳寿命分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [5]不锈钢激光焊接推荐工艺规范: GB/T 37778—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [6] Structural requirements of railway vehicle bodies; EN 12663-1; 2010+A1; 2014[S]. Brussel: CEN, 2010.
- [7]李远豪. 非熔透激光焊接疲劳断裂机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [8]金属材料疲劳试验数据统计方案与分析方法: GB/T 24176—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

## Simulation Method and Strength Evaluation of Laser Welding Connection of Stainless Steel Car Body

XIE Suming<sup>1</sup>, LI Bingxin<sup>1</sup>, XUE Ningxin<sup>2</sup>, LI Yana<sup>1</sup>

(1. School of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China)

**Abstract:** Finite element analysis method is used to study the simulation method and strength analysis of the laser welding connection of the stainless steel car body side wall. Firstly, the analysis models of solid, shell and beam elements to simulate the strength of semi-penetration lap laser welding, and the analysis models of beam elements to simulate different weld lengths were established respectively, and the weld element type suitable for the analysis of the strength of the laser welded connection of the complex structure is determined through the comparative analysis under the same calculation conditions. Next, joint fatigue test data and the analysis results of different weld length models, the evaluation methods for static strength and fatigue strength of laser welded connections for complex structures are summarized based on the GB/T 37778—2019 standard. Then, an analysis model for the structural strength of a stainless steel body by arc welding-spot welding-laser welding was established, and the laser welding connection strength of the stainless steel car body side wall is analyzed under the static and dynamic load conditions specified in the EN 12663-1; 2010+A1; 2014 standard. The results show that the minimum safety factor of the laser-welded beam element in the upper side beam area in the middle of the vehicle body side wall under the coupler compression condition of AW3 state is 1.03. The variation range of the calculated shear stress of the beam elements in the laser welding area of the car body side wall is far lower than the fatigue strength values of the 106th and 107th times, and the fatigue strength of the side wall laser welded connection is redundant.

**Keywords:** stainless steel body; laser welding; beam element; strength analysis