

基于主S-N曲线法的激光 - 电弧复合焊不锈钢疲劳性能研究

陈佳¹, 周攀¹, 王瑜超¹, 李勃伸¹, 杨俊杰¹, 沈鑫若楠¹, 靳军军²

¹成都工贸职业技术学院机械工程学院, 四川 成都

²西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年7月12日; 录用日期: 2026年8月5日; 发布日期: 2026年8月11日

摘要

为解决不锈钢焊接接头疲劳寿命评估中网格敏感性、残余应力影响等问题, 以地铁车辆用SUS301L-HT不锈钢为研究对象, 采用主S-N曲线法开展激光 - 电弧复合焊焊接接头疲劳寿命预测研究。建立不同网格尺寸的T型接头有限元模型, 验证结构应力的网格划分不敏感性; 通过激光 - 电弧复合焊制备SUS301L-HT不锈钢对接试板, 开展疲劳试验并基于名义应力法拟合S-N曲线, 进行线性回归与显著性检验; 利用Sysweld仿真焊接残余应力, 通过Matlab实现应力场文件格式转换并导入Abaqus, 完成残余应力叠加下的应力分析, 对比名义应力法与主S-N曲线法在残余应力影响下的疲劳寿命预测稳定性, 同时开展插接接头的疲劳寿命计算。结果表明: 结构应力对网格划分具有显著的不敏感性, 1 mm、2.5 mm、5 mm网格尺寸下T型接头焊趾处结构应力最大偏差仅2.5%; SUS301L-HT不锈钢焊接接头的疲劳应力与循环次数对数值呈显著线性关系, 拟合S-N曲线方程为 $\lg N = 10.334 - 0.009S$, 条件疲劳极限为367 MPa; 主S-N曲线法在残余应力影响下的疲劳寿命预测稳定性远优于名义应力法, 有无残余应力下疲劳寿命最大偏差仅13.3%, 而名义应力法达53.7%; 插接接头焊趾处疲劳寿命分布较为均匀, 整体疲劳性能良好。研究结果为激光 - 电弧复合焊不锈钢焊接接头的疲劳寿命评估提供了可靠方法, 也为轨道交通不锈钢焊接结构的抗疲劳设计提供理论依据。

关键词

激光 - 电弧复合焊, SUS301L-HT不锈钢, 焊接接头, 主S-N曲线法, 疲劳寿命

Research on Fatigue Properties of Laser-Arc Hybrid Welded Stainless Steel Based on Master S-N Curve Method

Jia Chen¹, Pan Zhou¹, Yuchao Wang¹, Boshen Li¹, Junjie Yang¹, Xinruonan Shen¹, Junjun Jin²

文章引用: 陈佳, 周攀, 王瑜超, 李勃伸, 杨俊杰, 沈鑫若楠, 靳军军. 基于主S-N曲线法的激光-电弧复合焊不锈钢疲劳性能研究[J]. 机械工程技术, 2026, 15(4): 413-422. DOI: 10.12677/met.2026.154040

Abstract

To solve the problems such as mesh sensitivity and residual stress influence in fatigue life evaluation of stainless-steel welded joints, taking SUS301L-HT stainless steel for metro vehicles as the research object, the fatigue life prediction of laser-arc hybrid welding joints was carried out by adopting the master S-N curve method. Finite element models of T-joints with different mesh sizes were established to verify the mesh insensitivity of structural stress. Butt test plates of SUS301L-HT stainless steel were fabricated by laser-arc hybrid welding, fatigue tests were conducted, S-N curves were fitted based on nominal stress method, and linear regression and significance test were carried out. Welding residual stress was simulated by Sysweld, the stress field file format was converted by Matlab and imported into Abaqus, the stress analysis under superposition of residual stress was completed, the prediction stability of fatigue life between nominal stress method and master S-N curve method under the influence of residual stress was compared, and the fatigue life calculation of plug joints was carried out at the same time. The results show that the structural stress has significant insensitivity to mesh division, and the maximum deviation of structural stress at the weld toe of T-joints with mesh sizes of 1 mm, 2.5 mm and 5 mm is only 2.5%. The fatigue stress of SUS301L-HT stainless steel welded joints has a significant linear relationship with the logarithm of cycle times, the fitted S-N curve equation is $\lg N = 10.334 - 0.009S$, and the conditional fatigue limit is 367 MPa. The prediction stability of fatigue life of the master S-N curve method under the influence of residual stress is far better than that of the nominal stress method, the maximum deviation of fatigue life with or without residual stress is only 13.3%, while that of the nominal stress method is 53.7%. The fatigue life distribution at the weld toe of the plug joint is relatively uniform, and the overall fatigue performance is good. The research results provide a reliable method for fatigue life evaluation of laser-arc hybrid welding stainless steel welded joints, and also provide a theoretical basis for anti-fatigue design of stainless-steel welded structures in rail transit.

Keywords

Laser-Arc Hybrid Welding, SUS301L-HT Stainless Steel, Welded Joint, Master S-N Curve Method, Fatigue Life

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

我国轨道交通产业的快速发展对地铁车辆结构的安全性、可靠性和耐久性提出了更高要求, 不锈钢因具有优异的耐腐蚀性、高强度和良好的成型性, 成为地铁车辆车体、走行部等核心结构的主要用材[1][2]。焊接是地铁不锈钢结构制造的关键工艺, 激光-电弧复合焊融合了激光焊的高能量密度、高焊接速度和电弧焊的熔深大、桥接能力强等优点, 在不锈钢焊接中得到广泛应用[3][4]。但焊接过程中因局部不均匀加热与冷却, 会产生焊接残余应力和应力集中, 焊接接头在地铁车辆服役过程的循环载荷作用下,

极易发生疲劳破坏,成为制约地铁车辆运行安全的关键问题[5][6]。因此,开展激光-电弧复合焊不锈钢焊接接头的疲劳寿命预测研究,对地铁车辆不锈钢焊接结构的设计与安全使用具有重要的工程意义。

目前,焊接结构疲劳寿命评估方法主要包括名义应力法、热点应力法和结构应力法[7]。名义应力法应用最为广泛,通过大量试验拟合不同接头形式的 S-N 曲线,但其高度依赖焊接接头的几何细节,对残余应力的考虑不充分,且有限元计算结果受网格划分影响较大;热点应力法通过外推法确定焊趾处的热点应力,一定程度上解决了名义应力法对几何细节的敏感性问题,但未考虑焊趾处沿板厚方向的应力分布,且外推结果对网格尺寸和外推方法仍具有敏感性[8];结构应力法基于结构力学的力与力矩平衡原理,将焊趾处的应力分解为膜应力和弯曲应力,能够反映沿板厚方向的应力分布特征,且具有网格划分不敏感性[9]。以结构应力法为基础的主 S-N 曲线法,综合考虑了应力集中、板厚、载荷模式等因素对疲劳寿命的影响,通过等效结构应力将不同接头形式、不同载荷条件下的疲劳寿命评估归一化,成为焊接结构疲劳寿命评估的研究热点[10][11]。

美国机械工程师协会(ASME)已将主 S-N 曲线法纳入锅炉和压力容器规范(ASME BPVC VIII-2-2015),该方法在船舶、压力容器等领域的焊接结构疲劳评估中得到了成功应用[12],但在轨道交通激光-电弧复合焊不锈钢焊接接头中的应用研究仍处于起步阶段。针对现有研究的不足,本文以 SUS301L-HT 不锈钢为研究对象,系统开展主 S-N 曲线法在激光-电弧复合焊焊接接头疲劳寿命预测中的应用研究。通过有限元仿真验证结构应力的网格不敏感性;开展焊接接头疲劳试验,拟合名义应力 S-N 曲线并进行统计分析;仿真焊接残余应力并实现其在有限元分析中的叠加,对比名义应力法与主 S-N 曲线法的预测性能;同时开展地铁不锈钢结构中典型插接接头的疲劳寿命计算。研究旨在揭示主 S-N 曲线法评估激光-电弧复合焊不锈钢焊接接头疲劳寿命的有效性,为该方法在轨道交通不锈钢焊接结构中的工程应用提供数据支撑和技术参考。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

试验用母材为地铁车辆结构常用的 SUS301L-HT 亚稳态奥氏体不锈钢,该材料具有高抗拉强度、良好的冷加工性和耐腐蚀性,适用于承受循环载荷的焊接结构。焊接焊丝选用直径 1.5 mm 的 ER308L 不锈钢焊丝,其化学成分与母材匹配性良好,能够保证焊接接头的力学性能和耐腐蚀性。母材与焊丝的化学成分如表 1 所示,SUS301L-HT 不锈钢的室温力学性能如表 2 所示。

Table 1. Chemical composition of SUS301L-HT and ER308L welding wire

表 1. SUS301L-HT 和 ER308L 焊丝的元素组成

材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	N	P
SUS301L-HT	0.02	0.39	1.12	17.24	7.10	0.046	0.10	0.034
ER308L	0.02	0.42	1.65	20.10	10.30	-	-	-

Table 2. Mechanical properties of SUS301L-HT stainless steel at room temperature

表 2. SUS301L-HT 不锈钢的室温力学性能

材料牌号	弹性模量(GPa)	泊松比	密度(N/m ²)	抗拉强度(MPa)	屈服强度(MPa)
SUS301L-HT	206	0.3	7838	969	689

2.2. 焊接试板制备

采用激光-MAG 复合焊工艺制备 SUS301L-HT 不锈钢对接试板, 试板尺寸为 $150\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 焊接前将试板待焊边缘打磨至露出金属光泽, 去除氧化皮、油污等杂质, 防止焊接缺陷产生。焊接试验设备包括 IPGYSL4000 光纤激光器、MAG 焊机、ABB IRB6640 型焊接机械手臂, 保护气体为 $95\% \text{ Ar} + 5\% \text{ CO}_2$, 气体流量为 20 L/min , 防止焊缝金属氧化。

激光-电弧复合焊的工艺参数经正交试验优化确定, 具体参数为: 激光功率 4.8 kW , 激光离焦量 0 mm , 电弧电压 28 V , 焊接电流 180 A , 焊接速度 28 mm/s , 送丝速度 16 m/min , 激光与电弧的间距为 3 mm , 电弧在前、激光在后的焊接方式。焊接完成后, 对试板进行外观检查和超声波探伤, 确保试板无气孔、裂纹、未熔合等焊接缺陷, 选取合格试板进行后续疲劳试样加工。

2.3. 疲劳试验

按照 GB/T 3075-2008《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》加工光滑疲劳试样, 试样标距段直径为 8 mm , 标距长度为 40 mm , 夹持段采用螺纹连接, 与疲劳试验机夹头匹配。疲劳试验在电液伺服疲劳试验机上进行, 试验采用轴向恒幅载荷控制, 试验频率为 83.5 Hz , 应力比 $R = 0.1$ (最小应力/最大应力), 设定 1000 万次循环为疲劳极限判定标准, 若试样循环次数达到 1000 万次未发生断裂, 则认为试样达到疲劳极限。

试验设置 5 个应力级, 分别为 538 MPa 、 500 MPa 、 462 MPa 、 424 MPa 、 386 MPa 、 348 MPa , 每个应力级制备 2 个试样, 共计 12 个试样。试验过程中记录每个试样的断裂循环次数, 若试样在达到 1000 万次循环前发生断裂, 记录其实际循环次数; 若达到 1000 万次循环未断裂, 停止试验并记为未断裂。试验完成后, 对疲劳试样的断口进行宏观观察, 分析疲劳断裂特征。

2.4. 有限元仿真分析

采用 Abaqus、Sysweld、Fe-safe 有限元软件开展多物理场仿真与疲劳寿命计算, 主要包括 T 型接头结构应力的网格敏感性验证、焊接残余应力仿真、残余应力叠加下的应力分析及疲劳寿命预测。

2.4.1. T 型接头结构应力网格敏感性验证

在 Abaqus 中建立 T 型接头有限元模型, 底板尺寸为 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 立板尺寸为 $200\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 采用角焊缝连接, 焊脚高度为 6 mm 。分别采用 1 mm 、 2.5 mm 、 5 mm 三种网格尺寸对模型进行自由网格划分, 单元类型选用三维实体单元 C3D8 (八节点六面体单元) 和 C3D6 (六节点五面体单元), 在焊趾处进行网格局部细化, 保证焊趾处的单元质量。对 T 型接头底板两端施加固定约束, 在立板顶部施加 Z 轴方向的集中拉力 200 kN , 分别计算三种网格尺寸下焊趾处的范氏等效应力、最大主应力和结构应力, 分析网格尺寸对不同应力计算结果的影响。

2.4.2. 焊接残余应力仿真与格式转换

利用 Sysweld 软件开展 SUS301L-HT 不锈钢焊板的焊接残余应力仿真。首先在 Sysweld 的 Visual-Mesh 模块建立焊板有限元模型, 单元类型为三维热-结构耦合单元, 网格尺寸为 2 mm , 焊缝区域网格细化至 1 mm 。采用移动高斯热源模拟激光-电弧复合焊的热源分布, 热源参数根据焊接工艺参数确定, 设置焊接过程的边界条件: 环境温度 25°C , 焊板与夹具的对流换热系数为 $15\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, 辐射换热系数为 0.8 。

首先进行焊接温度场仿真, 计算焊接过程中焊板的瞬态温度分布, 将温度场结果作为载荷导入结构场仿真, 计算焊接完成后焊板冷却至室温的残余应力分布。仿真完成后, 输出残余应力的 6 个分量文件 (XX, YY, ZZ, XY, YZ, ZX), 由于 Sysweld 的应力场文件格式与 Abaqus 不兼容, 采用 Matlab 编写程序,

将 6 个应力分量文件转换为 Abaqus 支持的 csv 格式, 合成完整的残余应力场文件。同时, 利用 Sysweld 的机加工模块模拟工程实际中焊缝余高的打磨过程, 将焊缝余高单元单独分组, 在焊接完成后(551 s)将其失活, 计算焊缝余高打磨后的残余应力分布。

2.4.3. 残余应力叠加与疲劳寿命计算

在 Abaqus 中建立与 Sysweld 对应的 SUS301L-HT 不锈钢焊板有限元模型, 赋予材料的力学性能参数。将 Matlab 转换后的残余应力场文件导入 Abaqus, 实现残余应力的初始加载。在焊板一端施加固定约束, 另一端施加轴向拉伸载荷, 模拟疲劳试验的载荷条件, 分别计算有无残余应力叠加下焊板焊趾处的应力分布。

利用 Fe-safe 疲劳分析软件, 分别采用名义应力法和主 S-N 曲线法计算焊趾处的疲劳寿命。名义应力法基于试验拟合的 S-N 曲线, 结合 Goodman 平均应力修正理论考虑残余应力的影响; 主 S-N 曲线法依据 ASME BPVC VIII-2-2015 标准, 计算焊趾处的疲劳寿命。

3. 实验结果及分析

3.1. 结构应力的网格划分不敏感性验证

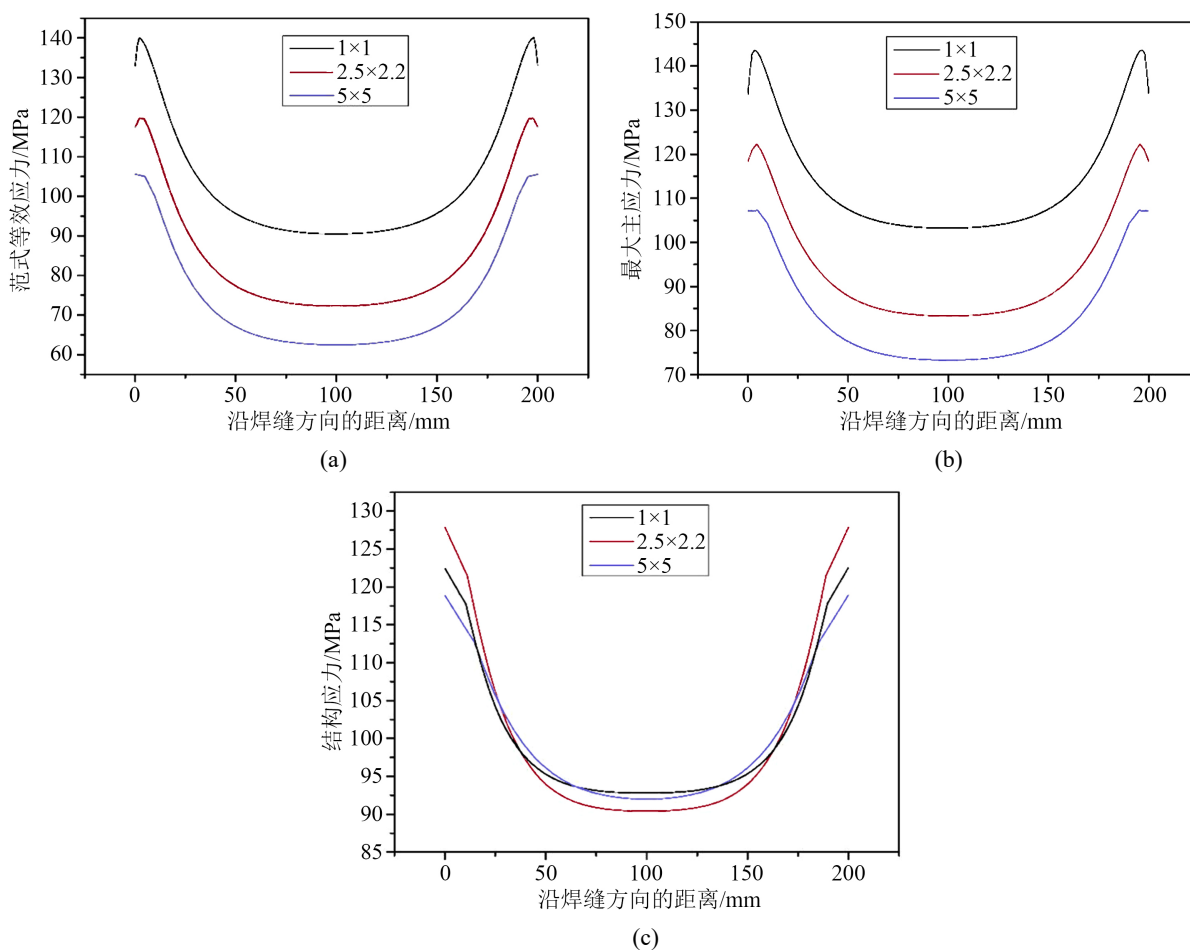


Figure 1. Stress distribution at the weld toe of T-joints with different mesh sizes. (a) von Mises equivalent stress; (b) Maximum principal stress; (c) Structural stress

图 1. 不同网格尺寸 T 型接头焊趾处的应力分布。(a) 范氏等效应力; (b) 最大主应力; (c) 结构应力

本文计算了 1 mm、2.5 mm、5 mm 三种网格尺寸下 T 型接头焊趾处的范式等效应力、最大主应力和结构应力，结果如图 1 所示。

从图 1(a)和图 1(b)可以看出，范式等效应力和最大主应力随网格尺寸的增大呈现显著的下降趋势，且沿焊缝方向的应力分布波动较大。1 mm 网格尺寸下，范式等效应力的最大值约为 140 MPa，最大主应力的最大值约为 150 MPa，均出现在焊缝中部的焊趾处；当网格尺寸增大至 5 mm 时，范式等效应力的最大值降至约 95 MPa，最大主应力的最大值降至约 90 MPa，应力集中效应被明显平均化。从表 3 可以看出，与 1 mm 网格尺寸相比，2.5 mm 和 5 mm 网格尺寸下范式等效应力的相对偏差分别为 16.5%和 29.6%，最大主应力的相对偏差分别为 25.0%和 37.9%，表明传统应力计算方法存在极强的网格敏感性，网格尺寸的变化会导致计算结果产生巨大偏差。

这种网格敏感性源于焊趾处的几何突变导致的应力奇异，在有限元分析中，应力奇异区域的计算结果会随网格尺寸的减小而无限增大，无法得到收敛的应力值[13]。工程实际中，为获得较为准确的传统应力计算结果，需要进行大量的网格加密试算，直至应力结果趋于收敛，这不仅大幅增加了网格数量和计算成本，还对计算机硬件提出了较高要求，不利于复杂焊接结构的应力分析。

与传统应力计算方法形成鲜明对比，图 1(c)中三种网格尺寸下的结构应力沿焊缝方向的分布曲线高度重合，应力值波动极小，呈现出良好的一致性。

3.2. 焊接接头的疲劳试验结果

开展轴向恒幅疲劳试验，试验应力比 $R = 0.1$ ，试验结果如表 3 所示。从表 4 可以看出，随着应力级的降低，试样的疲劳循环次数逐渐增加，当应力级降至 348 MPa 时，两个试样均完成 1000 万次循环未发生断裂，表明试样在该应力级下达到了疲劳极限；而应力级高于 348 MPa 时，试样均发生断裂，且同一应力级下的疲劳循环次数存在一定的离散性。

Table 3. Fatigue results of smooth SUS301LHT stainless steel specimens
表 3. SUS301LHT 不锈钢平滑试样疲劳结果

序号	应力级	应力比	循环次数/次	是否断裂
1	538	0.1	135,426	是
2	538	0.1	276,549	是
3	500	0.1	234,845	是
4	500	0.1	1.68E+06	是
5	462	0.1	2.08E+06	是
6	462	0.1	4.68E+06	是
7	424	0.1	5.79E+06	是
8	424	0.1	7.93E+06	是
9	386	0.1	6.99E+06	是
10	386	0.1	5.68E+06	是
11	348	0.1	1.00E+07	否
12	348	0.1	1.00E+07	否

所有断裂试样的断口均出现在焊趾处,表明焊趾处是焊接接头的疲劳薄弱部位。这是因为焊趾处存在几何突变,易产生应力集中;同时,焊接过程中焊趾处的晶粒粗大,组织不均匀,且存在一定的焊接残余应力,这些因素共同作用导致焊趾处成为疲劳裂纹的萌生源。疲劳裂纹在焊趾处萌生后,在循环载荷作用下沿板厚方向扩展,最终导致试样断裂,这与不锈钢焊接接头的典型疲劳断裂特征一致。

线性相关系数 r 的计算式如式(1)所示。

$$r = \frac{L_{XY}}{\sqrt{L_{XX}L_{YY}}} \quad (1)$$

式中 L_{XY} 、 L_{XX} 、 L_{YY} 为应力级和疲劳次数相关的参量。

式(1)中的三个参量可以由下列公式计算:

$$L_{XY} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \log N_i - \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \log N_i}{n} \quad (2)$$

$$L_{XX} = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sigma_i\right)^2}{n} \quad (3)$$

$$L_{YY} = \sum_{i=1}^n (\log N_i)^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \log N_i\right)^2}{n} \quad (4)$$

式中 σ_i ——第 i 个应力级;

$\log N_i$ ——第 i 个疲劳循环次数的对数值;

n ——样本量的个数。

线性相关系数 r 的绝对值越靠近 1,说明两组数据即应力级与疲劳寿命间的线性相关性越好。取标准差 $d=0$ 将表 3 中的数据代入式(5)中就算出各个应力级下的中值疲劳寿命。

$$\log N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log N_i \quad (5)$$

Table 4. Fitting data of fatigue performance curves for SUS301LHT stainless steel

表 4. SUS301LHT 不锈钢疲劳性能曲线拟合数据

σ /MPa	$X = \log N$	σ^2	X^2	$\sigma \log N$
538	5.1317	289,444	26.3344	2760.8557
538	5.4418	289,444	29.6129	2927.6734
500	5.3708	250,000	28.8453	2685.3907
500	6.2265	250,000	38.7695	3113.2561
462	6.3180	213,444	39.9165	2918.8932
462	6.6704	213,444	44.4943	3081.7260
424	6.7629	179,776	45.7365	2867.4600
424	6.8991	179,776	47.5972	2925.2080
386	6.8442	148,996	46.8430	2641.8593
386	6.7543	148,996	45.6212	2607.1785
348	7.0000	121,104	49.0000	2436.0000
348	7.0000	121,104	49.0000	2436.0000

将表 4 的各参数代入式(2)到(4)中, 计算得出 L_{XY} 、 L_{XX} 、 L_{YY} 的值分别为-452.3909、50540、5.1078。

则由式(1)得到 $r = -0.8904$, 由文献[14]中相关系数检验表可知 r 的绝对值大于 $n = 12$ 下对应的起码值 0.576, 这说明疲劳数据中疲劳应力级和疲劳循环次数间存在着线性关系, 可以使用最小二乘法使用直线拟合各个数据点, 进行一元线性回归分析。

构造直线拟合的直线方程如式(6)所示。

$$\log N = a + bS \quad (6)$$

式中 a 和 b 都是直线方程待定的常数, 并可以用下列公式计算所得[15]:

$$b = \frac{L_{XY}}{L_{XX}} \quad (7)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \log N_i}{n} - \frac{b \sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} \quad (8)$$

代入数据得到 $a = 10.334$, $b = -0.009$ 。则式(6)可以改写成直线方程:

$$\log N = 10.334 - 0.009S \quad (9)$$

利用式(9)所得到的直线绘制进入 S-IgN 曲线图中, 如图 2 所示。

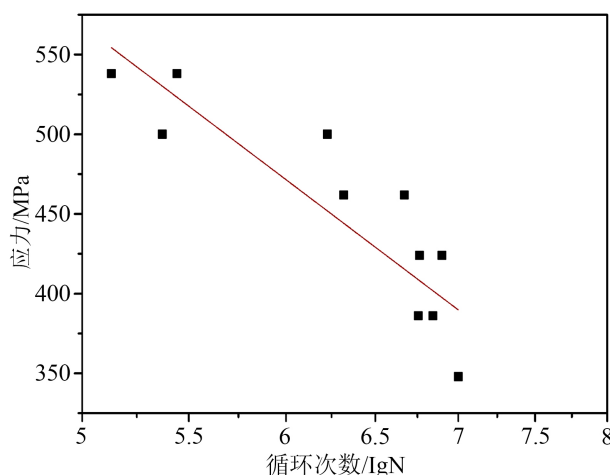


Figure 2. Curves of S-IgN

图 2. S-IgN 曲线

3.3. 基于主 S-N 曲线法的疲劳寿命预测

焊趾处的残余应力如图 3 所示。从图中可以看出, 由于外加拉力影响, 焊缝起始段(0~50 mm)和结尾端(250~300 mm)原始的残余应力有着一定程度的叠加抵消, 因为这两部分的残余应力减小, 继而也使结构应力减小。

沿焊缝方向的疲劳寿命结果如图 4 所示。

图 4 中, 有残余应力作用下的疲劳寿命小于没有残余应力状态的疲劳寿命, 两者差距最大点发生在沿焊缝方向 74.73 mm 处, 且有残余应力状态的疲劳寿命相对于无残余应力状态减少了 13.3%; 在沿焊缝方向 77.72 mm 处, 有无残余应力两种状态下疲劳寿命次数差距最大, 有残余应力状态下的疲劳寿命相比无残余应力状态下的减少了 53.7%。这说明结构应力法的计算结果明显好于残余应力对名义应力法计算

疲劳寿命的影响, 且结构应力法在两种残余应力状态下的疲劳寿命差异更加平滑, 如图 4 中沿焊缝方向 50~250 mm 阶段所示, 具有相对较好的疲劳寿命结果预测稳定性。

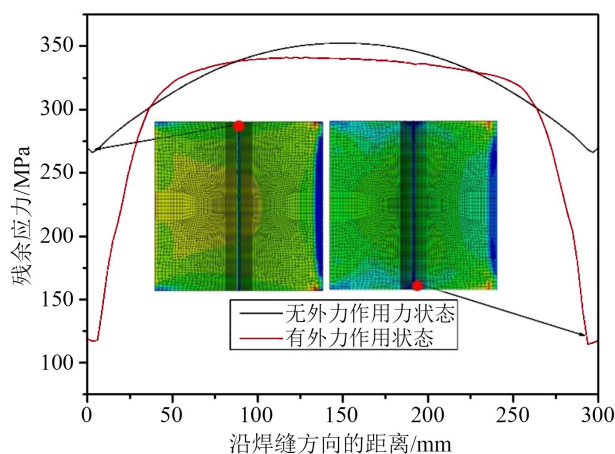


Figure 3. Redistribution of residual stress at weld toe under external load

图 3. 外力作用下焊趾处残余应力重分布

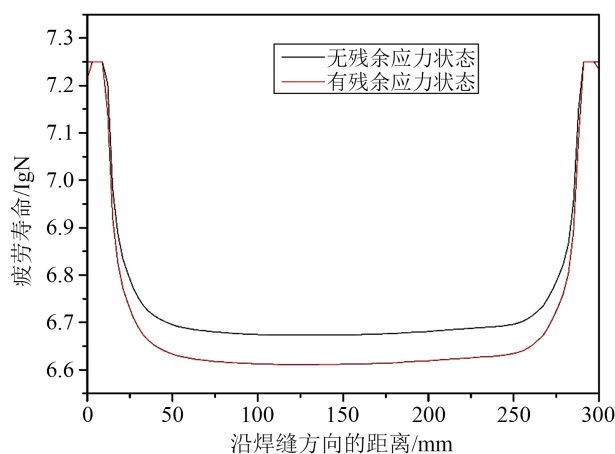


Figure 4. Fatigue life along the weld direction with and without residual stress

图 4. 有无残余应力状态下沿焊缝方向的疲劳寿命

4. 结论

(1) 结构应力对网格划分具有显著的不敏感性, 1 mm、2.5 mm、5 mm 三种网格尺寸下 T 型接头焊趾处结构应力计算结果高度重合, 最大偏差仅 2.5%, 可大幅降低有限元建模与计算成本, 适用于复杂轨道交通焊接结构分析。

(2) SUS301L-HT 不锈钢激光-电弧复合焊接接头疲劳应力与循环次数对数值呈显著线性关系, 拟合得到 S-N 曲线方程为 $\lg N = 10.334 - 0.009S$, 条件疲劳极限为 367 MPa, 可作为该材料焊接接头疲劳设计基础数据。

(3) 主 S-N 曲线法在残余应力影响下的疲劳寿命预测稳定性远优于名义应力法, 有无残余应力状态下疲劳寿命最大偏差仅 13.3%, 而名义应力法偏差达 53.7%, 对残余应力的鲁棒性更优。

(4) 地铁枕梁典型插接接头焊趾处疲劳寿命分布均匀, 基于主 S-N 曲线法预测关键焊缝疲劳寿命均满足 1000 万次循环要求, 全尺寸疲劳试验验证无宏观裂纹, 仿真与试验结果一致。

(5) 主 S-N 曲线法可有效应用于激光-电弧复合焊不锈钢焊接接头及地铁枕梁等轨道交通焊接结构的疲劳寿命评估, 为结构抗疲劳设计与安全评定提供可靠理论与方法支撑。

基金项目

成都工贸职业技术学院 2026 年度科研项目重点课题, 校级, 课题名称: 在役油气管道环焊缝应力腐蚀损伤智能感知研究, 课题编号: GMJS20262101。

参考文献

- [1] 杜海宪, 徐锋, 洪流, 等. SUS301L 不锈钢冷轧产品的开发[J]. 世界钢铁, 2010, 10(6): 52-54.
- [2] 苏柯, 谢红兵, 岳译新. SUS301L 系列不锈钢在轻量化城轨车辆车体上的应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2010, 33(6): 23-26.
- [3] 兆文忠, 魏鸿亮, 方吉, 李季涛. 基于主 S-N 曲线法的焊接结构虚拟疲劳试验理论与应用[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 75-78+117.
- [4] 岳译新, 刘永强, 李晓峰. 基于主 S-N 曲线法的地铁车体焊缝疲劳分析[J]. 机车电传动, 2012(5): 79-81.
- [5] Dong, P. (2001) A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Analysis of Welded Joints. *International Journal of Fatigue*, **23**, 865-876. [https://doi.org/10.1016/s0142-1123\(01\)00055-x](https://doi.org/10.1016/s0142-1123(01)00055-x)
- [6] 周张义, 李芾, 卜继玲. 基于名义应力的焊接结构疲劳强度评定方法研究[J]. 铁道机车与动车, 2007(7): 1-4.
- [7] 兆文忠, 李向伟, 董平沙. 焊接结构抗疲劳设计理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [8] Hobbacher, A.F. (2016) Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2>
- [9] Dong, P., Hong, J.K., Osage, D., *et al.* (2010) The Master S-N Curve Method an Implementation for Fatigue Evaluation of Welded Components in the ASME B&PV Code Section VIII, Division 2 and API579-1/ASME FFS-1. WRC Bulletin.
- [10] 赵峰. 基于网格不敏感结构应力的铝合金焊接接头疲劳性能分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2013.
- [11] 鞠盈子. 高速动车组铝合金车体焊缝疲劳寿命预测[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2013.
- [12] The American Society of Mechanical Engineers (2015) ASME BPVC-VIII-2-2015 ASME Boiler and Pressure Vessel Code. The American Society of Mechanical Engineers.
- [13] 尚其刚, 李彦红. 国内外疲劳寿命分析技术综述[J]. 科学时代, 2013(19): 2.
- [14] 高镇同, 熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [15] 桂立丰. 机械工程材料测试手册(力学篇) [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001.