

T 型接头角焊缝几何特征对疲劳性能的影响

孔 风¹ 于 闯¹ 高明亮¹ 薛世海¹ 晏中华² 高 珊¹

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司检修研发部, 130062, 长春;

2. 沈阳铁路局集团有限公司长春工务段, 130062, 长春//第一作者, 教授级高级工程师)

摘 要 为研究焊缝几何特征对 S355 钢 T 型接头角焊缝疲劳性能的影响, 运用 Abaqus 软件, 建立了平面型、凸圆弧形、凹圆弧形 3 种焊缝几何特征的 T 型接头有限元模型。根据国际铁路联盟标准中的加载指标, 计算得到主板上表面距离焊趾 0.4 倍和 1.0 倍板厚处沿外载荷方向的最大应力值, 并基于热点应力法外推焊趾处的应力值。通过 Miner 准则进行疲劳积累损伤比的计算和比较, 得出相同加载状态下的 3 种几何特征的 T 型焊缝抗疲劳能力强弱, 并得到以下结论: 凸圆弧形角焊缝累积损伤比最大, 抗疲劳能力最差; 凹圆弧形角焊缝累积损伤比最小, 具有较好的抗疲劳能力。

关键词 T 型接头焊缝; 几何特征; 应力集中; 疲劳损伤; 累积损伤比

中图分类号 TG405; U270.6⁺4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.02.016

Influence of Weld Seam Geometric Characteristics on Fatigue Performance of T-type Joint
KONG Feng, YU Chuang, GAO Mingliang, XUE Shihai, YAN Zhonghua, GAO Shan

Abstract In order to study the influence of different weld geometric characteristics on the fatigue performance of S355 steel T-type joints, by using Abaqus software, a T-type joint weld finite element model with three geometric features is established, including planar weld, convex arc weld and concave arc weld. According to the loading index in UIC standards, the maximum stress value of the model that is 0.4 to 1.0 times the distance from the welding toes along the external load direction is calculated, the fatigue resistance of the fillet weld with different geometric characteristics is obtained. It is concluded that the cumulative damage ratio of convex arc weld is the biggest compared with other two welding methods, and the anti-fatigue ability is the worst.

Key words T-type weld joint; geometric characteristics; emergency focus; fatigue damage; cumulative damage ratio

First-author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

疲劳破坏是材料在承受低于材料强度极限的交变载荷作用下, 使得材料或结构产生裂纹并伴随裂纹的不断扩展, 最终导致失效破坏的发生^[1]。疲劳破坏是最常见的一种失效形式, 据统计显示, 机械零件的损伤有 60% ~ 90% 属于疲劳破坏。

焊接接头的疲劳强度大大低于基体金属, 其重要的原因是焊接接头的焊趾处存在应力集中, 而焊缝的大小、形状对应力集中程度有直接影响。焊趾处应力集中的原因是因为存在焊缝余高、焊接缺陷及复杂残余拉应力, 而应力集中导致焊趾处的疲劳性能最差。

文献[2]表明, 对于金属材料, 焊缝的几何特征可有效影响焊接接头的疲劳强度。李敬勇^[3]在焊缝存在余高的情况下, 通过焊趾处的应力集中系数和仿真研究, 证明了焊接接头的疲劳性能与焊缝余高相关, 且为负相关。王德俊^[4]通过开展铝合金不同几何尺寸和焊缝形式的焊接接头疲劳试验, 证明了疲劳强度的降低因子与疲劳寿命有直接关系。邵辉成^[5]对含有焊缝余高的焊接结构连接件通过名义应力法进行了仿真分析和强度预测; 王润^[6]深入分析了去掉焊缝余高、保留焊缝余高的铝合金焊接接头, 对其疲劳性能进行了深入研究, 结果表明在中值疲劳极限方面两种焊接接头的性能基本相同。

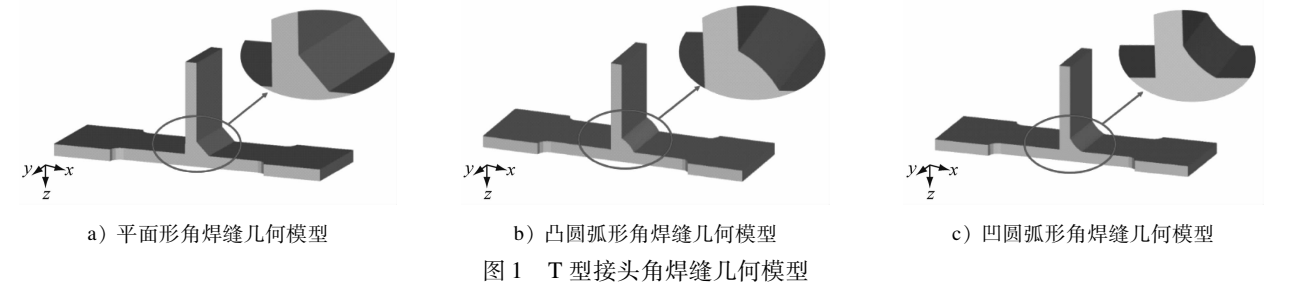
尽管人们对焊趾处的应力集中以及焊缝余高等对焊接接头疲劳性能的影响给予关注, 但对 T 型接头研究资料欠足。本文以 S355 钢为例, 建立了 3 种几何特征的 T 型角焊缝有限元模型。根据国际铁路联盟标准 (UIC) 的加载标准, 计算得出不同几何特征的 T 型角焊缝模型在各工况下沿外载荷方向的最大应力值, 然后根据国际焊接协会 (IIW) 关于热点应力法的相关标准, 计算 3 种几何特征的 T 型角焊缝疲劳寿命和损伤比。通过 Miner 准则进行疲劳积累损伤比的计算并进行比较, 得出相同加载

状态下不同几何特征的角焊缝接头抗疲劳能力的强弱,从而为相关研究提供理论依据。

1 焊缝模型建立

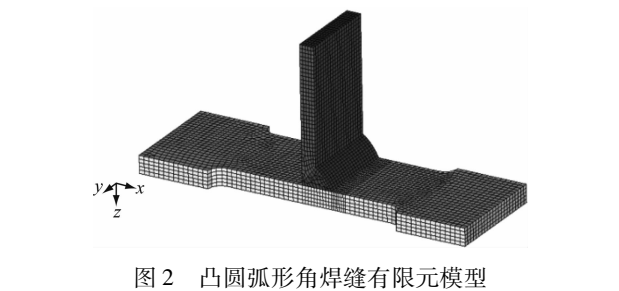
1.1 几何模型

为了分析焊缝几何特征对 T 型接头角焊缝疲劳性能的影响规律,建立了 3 种不同几何特征的焊缝,分别为平面形角焊缝、凸圆弧形角焊缝、凹圆弧形角焊缝。模型的几何尺寸如表 1 所示,几何模型



1.2 有限元模型

采用有限元前处理软件 HyperMesh 进行网格划分时,综合考虑仿真计算时间和构建方式,根据应力场的强度和分布情况,采用稀疏网格进行粗化和细化:在重点区域采用细的网格进行剖分,以提高焊缝有限元模型精度;在焊缝远离区域采用粗网格剖分,以减少计算时间,提高模型运算速度^[7]。采用以上方式得到的凸圆弧形角焊缝的有限元模型如图 2 所示。



1.3 载荷方案

以 T 型接头平面形角焊缝为例,参照 UIC 给出的加载标准,对该模型进行加载。加载分为 3 个阶段进行,载荷的大小分别为 30、36、42 MPa,对应的加载次数分别为 600 万次、200 万次、200 万次,其约束条件如图 3 所示。

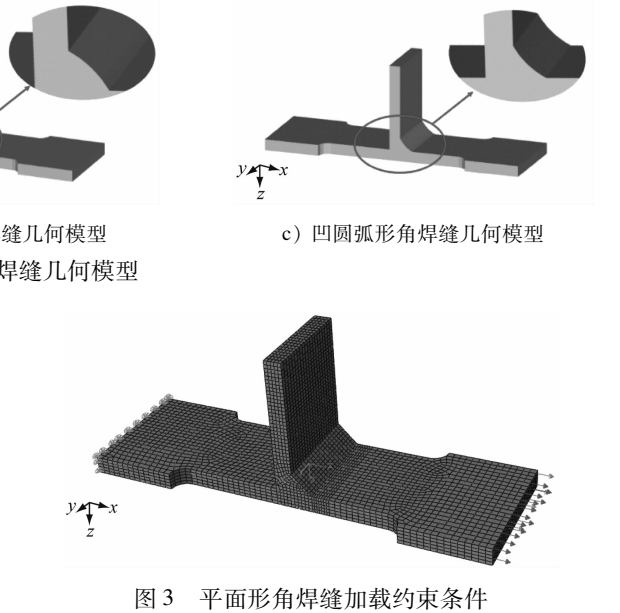
2 计算与分析

2.1 应力计算结果

以凹圆弧形角焊缝为例,沿外载荷方向的最大

如图 1 所示,其中,3 种几何特征角焊缝的焊脚长度均为 10 mm。

表 1 T 型接头角焊缝几何模型尺寸				m
部件	长度	宽度	厚度	
主板主体	190	60	10	
主板标距段	110	46	10	
腹板	60	46	10	



应力计算结果如图 4 所示。通过应力云图可以发现,该焊接构件的焊趾处产生较大的应力集中。参照 IIW 标准,焊接接头名义应力的计算是忽略了焊接接头局部应力的增长效应,计算所研究截面的应力。但焊趾处由于存在结构变化,本身就存在着应力集中,这导致名义应力无法准确的表征焊趾处的应力状态。而热点应力考虑了所有由于结构变化引起的应力集中,对于焊接接头推荐使用热点应力法。

利用热点应力法对 3 种几何特征的 T 型接头非承载角焊缝进行研究,以考察不同焊缝几何特征对其疲劳性能的影响规律。用外推法计算得到的热点应力,热点应力曲线呈现形分布。提取的应力为主板上表面距离焊趾 0.4 和 1.0 倍板厚处沿外载荷方向的最大主应力值,再根据热点应力外推公式计算出焊趾处热点应力值,外推公式如式(1)所示,计算结果如表 2 所示。

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t}$$

(1)

式中:

- σ_{hs} ——焊趾处的热点应力;
- $\sigma_{0.4t}$ ——距焊趾 0.4 倍板厚处的应力值;
- $\sigma_{1.0t}$ ——距离焊趾处 1.0 倍板厚处的应力值。

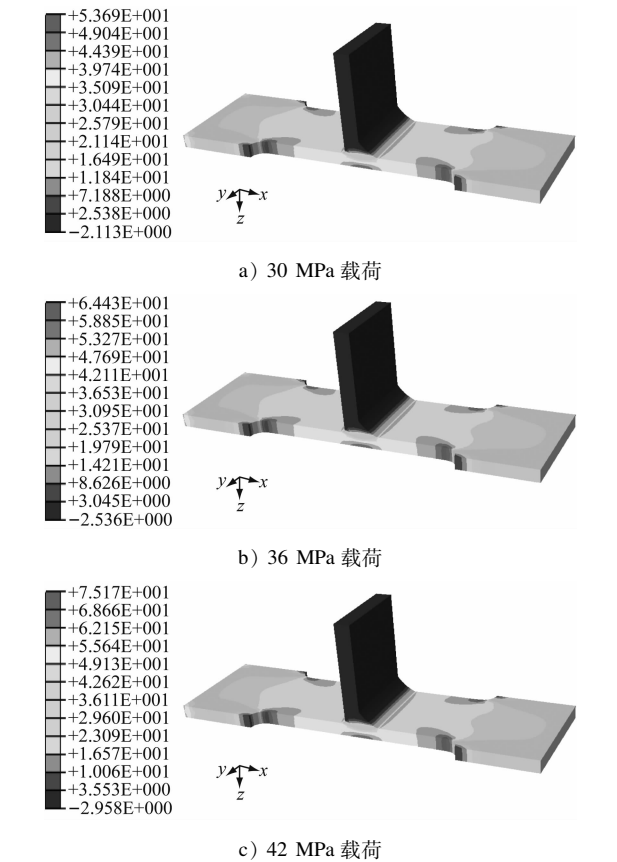


图 4 凹圆弧形角焊缝应力云图

表 2 T 型接头角焊缝在距焊趾 0.4 和 1.0 倍板厚处沿外 载荷方向的最大应力值 MPa				
焊缝几何形状	加载应力	$\sigma_{0.4t}$	$\sigma_{1.0t}$	σ_{hs}
平面形	30	38.347 6	38.198 1	38.447 8
	36	46.017 1	45.837 7	46.137 3
	42	53.686 7	53.477 3	53.827 0
凸圆弧形	30	38.45 4	38.186 9	38.633 0
	36	46.114 9	45.824 3	46.309 6
	42	53.835 7	53.461 7	54.086 3
凹圆弧形	30	38.276 2	38.228 1	38.308 4
	36	45.931 5	45.873 7	45.970 2
	42	53.586 7	53.519 3	53.631 9

2.2 疲劳性能分析

IIW doc. XIII-1539 标准对热点应力法 $S-N$ 曲线的选取有明确的规范。对于 T 型接头不同焊缝几何特征的疲劳性能,根据模拟的材料和焊缝类型

选取疲劳等级 FAT 为 100 的 $S-N$ 曲线(若角焊缝焊趾打磨,则疲劳等级 FAT 为 112)。在表 2 中已给出了不同焊缝几何特征和不同加载阶段下的热点应力范围。根据表 3 给出的疲劳特性曲线参数及式(2)计算得到的线性疲劳累积损伤比,通过比较损伤比的大小即可得出 3 种焊缝几何特征的 S355 钢板纵向焊缝线性疲劳累积损伤比。计算结果如表 4 所示。

$$D = \frac{n_i}{N_i} = \begin{cases} \frac{n_i (\Delta\sigma_{hs,i})^m}{C_1} & \Delta\sigma_1 > \Delta\sigma_2 \\ \frac{n_i (\Delta\sigma_{hs,i})^{m+2}}{C_2} & \Delta\sigma_1 \leq \Delta\sigma_{hs,i} \leq \Delta\sigma_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

- D ——线性疲劳累积损伤比;
- $\Delta\sigma_{hs,i}$ ——热点应力范围;
- n_i ——载荷谱 i 中 $\Delta\sigma_{hs,i}$ 作用下的循环次数;
- N_i ——Miner 准则特征抗疲劳 $S-N$ 曲线中,导致失效的 $\Delta\sigma_{hs,i}$ 的循环次数;
- m —— $S-N$ 曲线的斜率;
- $\Delta\sigma_1$ ——截止疲劳极限;
- $\Delta\sigma_2$ ——常幅疲劳极限;
- C_1 、 C_2 —— $S-N$ 曲线常数。

表 3 Miner 准则特征抗疲劳 $S-N$ 曲线参数的修正值

FAT	C_1	常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_2/\text{MPa}$	C_2	截止极限 $\Delta\sigma_1/\text{MPa}$
100	2.000×10^{12}	73.7	1.086×10^{16}	40.5

注: $\Delta\sigma_2$ 为初始斜率 $m_1 = 3.0$ 、循环数 $N = 5 \times 10^6$ 时的常幅疲劳极限; $\Delta\sigma_1$ 为二次斜率 $m_2 = 5.0$ 、循环数 $N = 5 \times 10^8$ 时的截止疲劳极限; C_1 为循环数 $N < 5 \times 10^6$ 、初始斜率 $m_1 = 3$ 时的 $S-N$ 曲线常数; C_2 为循环数 $N > 5 \times 10^6$ 、二次斜率 $m_2 = 5$ 时的 $S-N$ 曲线常数

计算结果表明:T 型接头平面形角焊缝的累积损伤比为 0.121 8,凸圆弧形角焊缝的累积损伤比为 0.124 5,凹圆弧形角焊缝的累积损伤比为 0.119 5;凸圆弧形角焊缝累积损伤比超出平面形角焊缝累积损伤比 2.22%,超出凹圆弧形角焊缝累积损伤比 4.18%,产生了较严重的应力集中效应;对于 3 种几个特征的 T 型接头角焊缝,凸圆弧形角焊缝累积损伤比最大,抗疲劳能力最差,凹圆弧形角焊缝累积损伤比最小,具有较好的抗疲劳能力。

3 结语

本文基于有限元数值分析研究焊缝几何特征对 S355 钢 T 型接头角焊缝疲劳性能的影响规律。

表 4 T 型接头角焊缝线性疲劳累积损伤比

几何特征	FAT	施加载荷 /MPa	$n_i/10^6$ 次	$\sigma_{0.4i}/$ MPa	$\sigma_{1.0i}/$ MPa	$\Delta\sigma_{hs,i}/$ MPa	损伤比 D_i	累积损伤比 D
平面形	80	30	6.00	38.347 6	38.198 1	38.447 8	0	0.121 8
		36	2.00	46.017 1	45.837 7	46.137 3	0.038 6	
		42	2.00	53.686 7	53.477 3	53.827 0	0.083 2	
凸圆弧形	80	30	6.00	38.454	38.186 9	38.633 0	0	0.124 5
		36	2.00	46.114 9	45.824 3	46.309 6	0.039 2	
		42	2.00	53.835 7	53.461 7	54.086 3	0.085 3	
凹圆弧形	80	30	6.00	38.276 2	38.228 1	38.308 4	0	0.119 5
		36	2.00	45.931 5	45.873 7	45.970 2	0.037 8	
		42	2.00	53.586 7	53.519 3	53.631 9	0.081 7	

运用 Abaqus 软件,建立了 3 种焊缝几何特征的 T 型接头有限元模型。根据 UIC 标准的加载标准,计算得到主板上表面距离焊趾 0.4 倍和 1.0 倍板厚处沿外载荷方向的最大应力值,并基于热点应力法外推焊趾处的应力值。通过 Miner 准则进行疲劳累积损伤比的计算并进行比较,得出相同加载状态下的不同几何特征的 T 型焊缝抗疲劳能力的强弱。主要结论如下:平面形角焊缝的累积损伤比为 0.121 8;凸圆弧形角焊缝的累积损伤比为 0.124 5;凹圆弧形角焊缝的累积损伤比为 0.119 5。对于 3 种几何特征的 T 型接头角焊缝,凸圆弧形角焊缝累积损伤比最大,抗疲劳能力最差;凹圆弧形角焊缝累积损伤比最小,具有较好的抗疲劳能力。

本文的研究结论可为提高焊缝控制精度、优化焊接结构、编制焊接工艺提供研究和理论依据。

参考文献

[1] 周传月,郑红霞,罗慧强,等. MscJFatigue 疲劳分析应用与实
(上接第 69 页)

[4] 张海,周新建,王成国,等. 轮轨非线性几何接触对车辆稳定性影响的研究[J]. 城市轨道交通研究,2015, 18(9): 43.

[5] 李晓峰,崔利通,沈文林. 某型高速动车组异常晃动问题调查研究[J]. 企业科技与发展,2017(9): 40.

例[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1.

[2] WOHLFAHRT H, WITSCHKE-PAGEL T H, ZINN W. Improvement of the fatigue strength of welded joints by post-weld treatment methods— a comparison of the results strength structural steels and high strength aluminium alloys [J]. Welding in the World, 1996, 38: 307.

[3] 李敬勇,李标峰,冯刚宪. 焊缝几何特征对 5A30 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(11): 1895.

[4] 王德俊,邵雨露,李艳红. 焊缝几何特征对铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 金属铸锻焊技术, 2011, 40(7): 28.

[5] 邵辉成,康建雄,刘庆华,等. 焊缝余高对焊接接头疲劳性能影响的定量分析[J]. 金属铸锻焊技术, 2011, 40(13): 12.

[6] 王润,侯振国,钮旭晶,等. 焊缝余高对 6082 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 工艺与新技术, 2013, 42(10): 35.

[7] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

(收稿日期:2018-10-11)

(收稿日期:2018-10-11)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704