

本文参考文献引用格式:王勇,张志毅,果伟,等.不同评定方法对高速列车 A7N01 铝合金焊接接头疲劳强度的影响[J].电焊机,2018,48(03):171-175.

不同评定方法对高速列车 A7N01 铝合金焊接接头疲劳强度的影响

王勇¹,张志毅¹,果伟¹,吴向阳¹,朱忠尹²

(1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东青岛 266111 2.西南交通大学材料科学与工程学院,四川成都 610031)

摘要 选取我国某类型高速列车常用的 A7N01S-T5 铝合金焊接对接接头,通过实验获得接头的名义应力 $S-N$ 曲线以及不同存活率下的疲劳强度。采用仿真分析方法获得接头热点应力、缺口应力,分别采用名义应力法、热点应力法、缺口应力法评定接头的疲劳强度。结果表明,通过应力比 $R=0$ 的拉-拉轴向加载疲劳试验,接头中值疲劳强度 $\Delta\sigma$ 为 45.77 MPa,经过 ± 2 倍标准差修正后,95%可靠度的疲劳强度 $\Delta\sigma_K$ 为 39.89 MPa,接头热点应力集中系数为 1.034,热点应力疲劳强度为 47.39 MPa,缺口应力疲劳强度为 123.03 MPa。缺口应力疲劳强度结果最大,热点应力疲劳强度次之,而名义应力疲劳强度最小。因此用名义应力法评定接头疲劳强度更趋于保守,而热点应力法以及缺口应力法需要全面考虑焊缝的细节因素,更加准确地进行受力分析,才能保证高速列车焊接结构的安全可靠性。

关键词: A7N01 铝合金焊接接头;疲劳强度评定;名义应力法;热点应力法;缺口应力法

中图分类号: U271.91 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-2303(2018)03-0171-05

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2018.03.32

Effects on fatigue properties of A7N01-T5 aluminum alloy welded joints for high-speed train by using different evaluation methods

WANG Yong¹, ZHANG Zhiyi¹, GUO Wei¹, WU Xiangyang¹, ZHU Zhongyin²

(1.CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China 2.School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract Experiments and analysis were made on A7N01S-T5 aluminum alloy welded joints. Nominal $S-N$ curves and the fatigue strength under different survival rate were obtained through the tension-tension fatigue tests. The hot spot stress gap stress were obtained by finite element method and then the fatigue properties were evaluated by using the nominal stress method hot spot stress and gap stress method. The results showed that the mean fatigue strength $\Delta\sigma$ was 45.77 MPa by the tension-tension load fatigue test, and after corrections of two standard plus or minus deviations the fatigue strength $\Delta\sigma_K$ was 39.89 MPa under the 95% reliability. The hot spot stress concentration factor was 1.034 and the hot spot stress fatigue strength was 47.39 MPa. The gap stress fatigue strength was 123.03 MPa. The fatigue strength under the gap stress method had the largest value, the value under the hot spot stress method was in the medium and the value under the nominal stress method was the smallest. The nominal stress method was more conservative than the other two but the hot spot stress method and gap stress method both need to evaluate the detailed factors and analyze the stress condition accurately so as to make sure the safety of high-speed trains.

Key words: A7N01 aluminum alloy welded joints; fatigue strength evaluation; nominal stress method; hot spot method; gap stress method

收稿日期:2018-02-07

作者简介:王勇(1984-)男,硕士,工程师,主要从事高速列车转向架工艺开发、设计及仿真技术方面的研究。E-mail: jg-wangyong@cqsf.com。

0 前言

绝大多数焊接接头的疲劳裂纹均发生在焊趾或焊根处,局部最大应力事实上起着主导作用,因此焊接接头的疲劳强度从整体到局部形成了 4 种不同结构层次的分析方法,即名义应力法、热点应力评定方法、缺口应力评定方法和断裂力学评定方法^[1-3]。目前国外有关疲劳设计和评定的标准多采用以名义应力表征的典型焊接结构件及接头的疲劳强度,如国际焊接学会设计标准 IIW-693-81^[4]、欧洲标准 Eurocode3。在轨道车辆工程中,有德国标准 DS952^[5]以及国际质量标准 UIC897-13。在 Niemi、Hobbacher^[6-7]等人的推动下,国际焊接学会(IIW)在其焊接结构疲劳设计文档(1996 年)中,将热点应力法作为 4 种疲劳设计和分析评定方法之一,对热点应力的表面外推确定给出了较详细的规定,确立了相应热点应力 $S-N$ 曲线。名义应力法^[8]存在一定

的缺点,而热点应力法^[9-10]、缺口应力法目前在高速列车铝合金焊接接头上鲜有应用。

A7N01 铝合金是制造高速列车底架的主要材料,A7N01 焊接接头组成牵引梁、枕梁、横梁等重要的承载部件^[11],因此在高速列车的结构中具有重要作用。本研究以高速列车 A7N01 铝合金焊接接头为主要对象,分别采用名义应力法、热点应力法、缺口应力法评定接头的疲劳强度,以期通过评定结果的差异性和可靠性为高速列车疲劳安全评估提供指导和借鉴。

1 试验

焊接母材为 A7N01S-T5 铝合金材料,板厚 8 mm。焊接材料为 ER5356 焊丝,直径 ϕ 1.6 mm。采用双脉冲型式的脉冲 MIG 焊,母材及焊丝的化学成分见表 1,焊接工艺参数见表 2。

表 1 母材及焊丝的化学成分

Table 1 Chemical constituent of matrix and welding wire

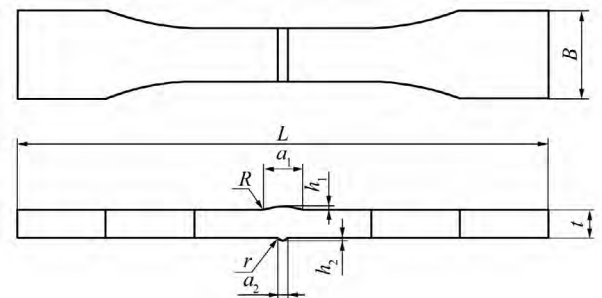
材料	w(Si)	w(Fe)	w(Cu)	w(Mn)	w(Mg)	w(Cr)	w(Zn)	w(其他)	w(Al)
A7N01S-T5	0.03	0.076	0.001	0.306	1.278	0.227	4.04	0.160 9	余量
ER5356	≤0.25	≤0.10	≤0.10	0.05~0.20	4.50~5.50	0.05~0.20	≤0.10	≤0.15	余量

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

铝合金材料	板厚 δ /mm	焊接电流 I /A	焊接电压 U /V	送丝速度 v /m·min ⁻¹	焊接速度 v /m·min ⁻¹	备注
A7N01P-T4	8	160	24	10	0.42	打底焊
		160	24	10	0.42	盖面焊

试样焊接完成后,采用 XXQ2505D-XK32 型 X 射线探伤系统对试样进行探伤,根据 ISO 10042-2005 评判接头质量。选取合格试样,采用 PLG-200 电磁共振疲劳试验机进行疲劳试验,加载条件为:室温, $R=0$,加载力的变化按正弦曲线变化,加载频率 90~110 Hz,加载载荷取 5~7 个应力等级。疲劳试验所用对接接头的尺寸如图 1 所示。



L, B, t 分别为试件总长、宽度、厚度; a_1, h_1, R 分别为焊缝正面余高宽度、高度、焊趾半径; a_2, h_2, r 分别为焊缝背面余高宽度、高度、焊趾半径。

图 1 对接接头尺寸

Fig.1 Dimension of butt joints

$$C_m = 10^{AB} \quad (4)$$

$$m \lg \Delta \sigma + \lg N = \lg C_m \quad (5)$$

$$X_m = \frac{\sum X_i}{n} \quad (6)$$

2 试验结果及讨论

2.1 焊接接头的疲劳强度

在进行焊接接头的疲劳强度计算及绘制 $S-N$ 曲线时,采用的公式如下

$$\lg S = -B \lg N + A \quad (1)$$

$$N = \frac{C_m}{(\Delta \sigma)^m} \quad (2)$$

$$m = \frac{1}{B} \quad (3)$$

$$stdv = \sqrt{\frac{\sum(X_i - X_m)^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$X_k = X_m - K \cdot stdv \quad (8)$$

式中 S 为所加载荷的名义应力范围 $\Delta\sigma$; N 为疲劳寿命 ; A 、 B 为拟合常数 ; C_m 为材料常数 ; m 为 $S-N$ 曲线的斜率 ; $stdv$ 为标准偏差 ; X_i 为试验数据的对数值 ; X_k 为计算特征值 ; n 为试样数量。

文献[12]给出了对应不同 n 的 K 值关系,如表 3 所示。

表 3 计算特征值 X_k 所对应的 K 值

Table 3 K value corresponding to the calculation of characteristic value X_k

n	K	n	K
5	3.50	30	2.15
10	2.70	40	2.05
15	2.40	50	2.00
20	2.30	100	1.90
25	2.20		

本次试验获得有效数据的试件有 7 个。用线性插值法计算试件的 K 值,得出 $K=3.18$ 。根据式(1)~式(5)计算出接头的疲劳试件的材料参数 m 和对应于 50%存活率的 C_m 。再根据式(5)~式(8)计算出特征值 X_k ,然后计算出接头的疲劳试件对应于 95%存活率的材料常数 C_k ,最后计算出接头试件的疲劳强度,结果如表 4 和图 2 所示。

2.2 热点应力法评定接头疲劳强度

对接头施加拉伸名义应力 50 MPa、40 MPa、

表 5 对接接头热点应力集中系数

Table 5 Hot spot stress concentration factor of butt joint

名义应力/MPa	焊趾处应力/MPa	0.4t	0.9t	1.4t	热点应力/MPa	热点应力集中系数	K_s 平均值
50	60.389	50.796	50.119	50.062	51.784	1.036	
40	48.311	40.837	40.295	40.250	41.628	1.033	1.035
30	38.233	30.877	30.472	30.437	31.067	1.036	

热点应力的双对数 $S-N$ 曲线采用式(10)和式(11)计算

$$m \lg \sigma + \lg N = \lg C_m \quad (10)$$

$$m \lg \sigma_{hs} + \lg N = \lg C_m + m \lg K_s \quad (11)$$

表 6 名义应力与热点应力疲劳强度对比

Table 6 Comparison data of nominal stress and hot spot stress

板厚/mm	接头形式	95%可靠度 $S-N$ 曲线	95%可靠度 疲劳强度/MPa	热点应力 $S-N$ 曲线	热点应力 疲劳强度/MPa
8	对接	$5.18 \lg \sigma + \lg N = 15.60$	45.77	$5.18 \lg \sigma + \lg N = 15.68$	47.39

表 4 试件 $S-N$ 曲线的数据

Table 4 Date of the $S-N$ curve

m	对应于 50%存活率		对应于 95%存活率	
	C_m	疲劳强度/MPa	C_k	疲劳强度/MPa
5.18	4.06×10^{15}	45.77	1.99×10^{15}	39.89

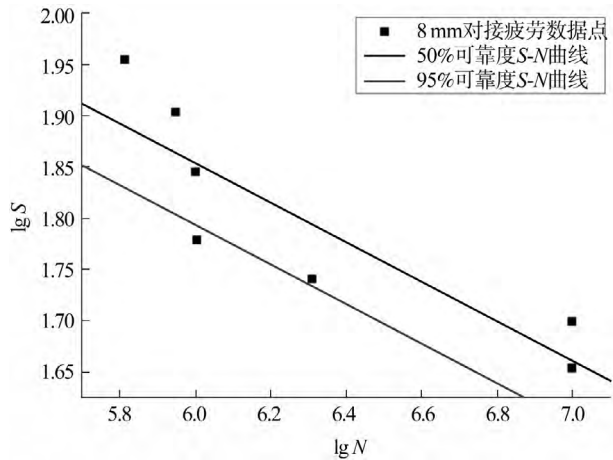


图 2 接头 $S-N$ 曲线

Fig.2 $S-N$ curve of joint

30 MPa,采用 IIW 推荐的三点二次外推公式

$$\sigma_{hs} = 2.52\sigma(0.4t) - 2.24\sigma(0.9t) + 0.72\sigma(1.4t) \quad (9)$$

式中 σ 为施加的名义应力 ; t 为试件板厚。

计算接头的热点应力,进而计算对接接头的热点应力集中系数,如表 5 所示。

由表 5 可知,载荷变化对结构应力分布的比例关系没有影响,对接接头热点应力集中系数计算结果为 1.035。

将 $N=1.0 \times 10^7$ 代入式(11),得到对应的热点应力疲劳强度 σ_{hs} 。名义应力、热点应力疲劳强度计算结果如表 6 所示。名义应力与热点应力 $S-N$ 曲线如图 3 所示。

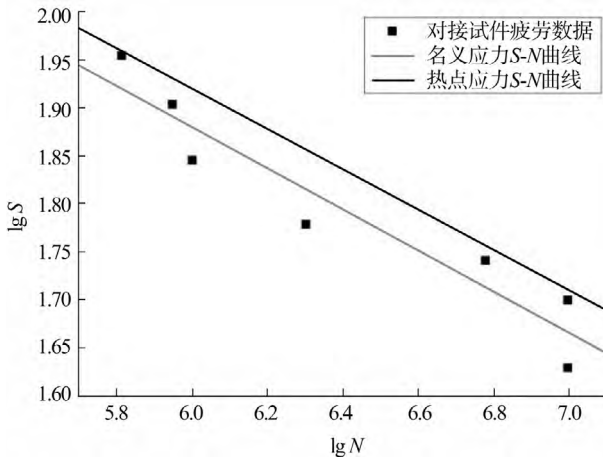


图 3 名义应力与热点应力的 S-N 曲线对比

Fig.3 Comparison of S-N curves of nominal stress and hot spot stress

2.3 缺口应力法评定接头疲劳强度

以图 1 焊缝尺寸为依据,焊趾半径取以应力平均法算得的 0.25 mm。给模型施加实验所加的名义应力幅值 $\Delta\sigma$,采用 Von Mises 准则计算出模型的局部缺口应力 σ_{Kmax} ,获得的最大缺口应力计算云图如图 4 所示。

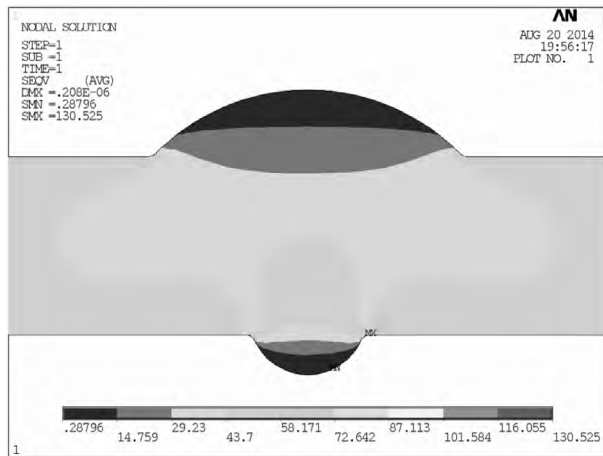


图 4 缺口应力计算云图

Fig.4 Map of gap stress calculation

当微观结构长度取 $\rho^*=0.1$ mm,等效缺口曲率半径 $\rho_f=0.25$ mm,计算得到的各接头试件的缺口应力及其断裂位置预测结果如表 7 所示。

根据计算出的缺口应力 σ_{Kmax} 和疲劳试验结果,绘制试件的实际循环次数 N 经缺口应力法评定后的 S-N 曲线(对应 50%的存活率),如图 5 所示。由此得到 1.0×10^7 循环次数下,采用缺口应力法评定后的 S-N 曲线及疲劳强度如表 8 所示。

表 7 最大缺口应力与断裂位置预测

Table 7 Maximum gap stress and fracture location forecast

板厚 /mm	接头形式	名义应力 /MPa	循环周次	最大缺口应力/MPa	预测断裂位置
8	对接	90	652 032	236.72	焊趾
		80	887 962	204.81	焊趾
		70	1 002 480	179.24	焊趾
		60	1 012 478	160.85	焊趾
		55	2 045 860	140.25	焊趾
		50	10 000 000	126.52	焊趾
		45	10 000 000	114.33	不断

表 8 缺口应力法疲劳评定

Table 8 Results of fatigue properties evaluation with the use of gap stress method

接头形式	S-N 曲线拟合公式	疲劳强度/MPa
对接	$5 \lg \sigma + \lg N = 17.45$	123.03

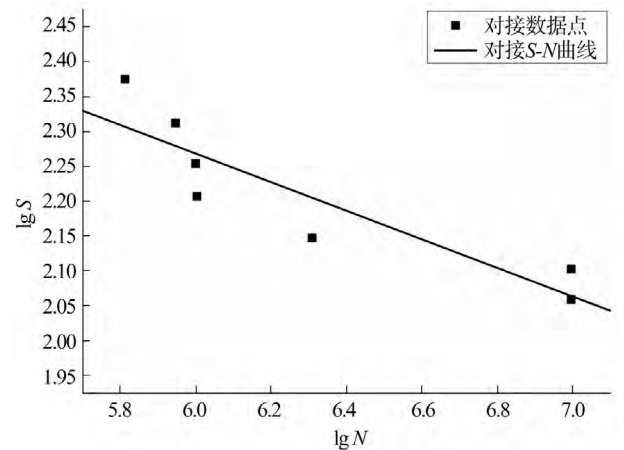


图 5 缺口应力法评定 S-N 曲线

Fig.5 S-N curves evaluation with the use of gap stress method

3 不同评定方法的差异分析

由表 6、表 8 的公式以及数据结果分析可知,同一种接头形式,缺口应力疲劳强度最大,热点应力疲劳强度次之,而名义应力疲劳强度最低。不同评定方法得到的 S-N 曲线斜率、截距均不同。

名义应力法计算截面时,包含所有焊缝细节,根据缺口等级选择 S-N 曲线,造成了疲劳数据(即 S-N 曲线)的分散带较大,由于计算截面为母材截面,当结构复杂时名义应力较难确定。而热点应力法在此基础上,通过分析焊接接头形式给结构带来的不连续性,考虑了结构间断而带来的应力集中,因此可以减小疲劳试验数据的离散度。对于复杂结构的

疲劳评定,只需关注“热点”,通过计算或测量求得关键部位的热点应力,再去寻找合适的 $S-N$ 曲线校核,这就简化了疲劳评定过程。缺口应力相对于前两者,在考虑焊接结构不连续的同时,还考虑了焊缝形状带来的缺口效应。研究表明,缺口应力是导致疲劳裂纹萌生和扩展的主要影响因素,缺口应力法采用了微观结构约束效应,通过虚拟缺口曲率半径,求得疲劳缺口系数。

用名义应力法评定接头疲劳强度更趋向于保守,而热点应力法和缺口应力法需要全面考虑焊缝的细节因素,更加准确地进行受力分析。因此在进行高速列车焊接结构疲劳强度设计时,应根据不同的设计要求及安全可靠性考虑,选择不同的疲劳强度评定方法,保证高速列车焊接结构的安全可靠性。

4 结论

(1)通过应力比 $R=0$ 的拉-拉轴向加载疲劳试验,接头中值疲劳强度 $\Delta\sigma$ 为 45.77 MPa,经过 ± 2 倍标准差修正后,95%可靠度的疲劳强度 $\Delta\sigma_k$ 为 39.89 MPa。

(2)采用 IIW 推荐的三节点二次外推公式进行 A7N01S-T5 铝合金焊接接头的热点应力计算,接头热点应力集中系数为 1.034,热点应力疲劳强度为 47.39 MPa。

(3)在缺口应力法评定中,取等效微观结构长度 $\rho^*=0.1$ mm,虚拟缺口曲率半径为 0.25 mm,弹性状态、平面应变条件下求解,缺口应力疲劳强度为 123.03 MPa。

(4)缺口应力疲劳强度结果最大,热点应力疲劳强度次之,名义应力疲劳强度最小。用名义应力

法评定接头疲劳强度更趋向于保守,而热点应力法和缺口应力法需要全面考虑焊缝的细节因素,更加准确地进行受力分析。

参考文献:

- [1] Fatigue design and assessment of steel structures[S]. BS7-608, London: British Standards Institution, 1993.
- [2] Fatigue design of welded joints and components. recommendations of IIW[S]. XIII-1539-96V-845-96, Cambridge: Abington Publishing, 1996.
- [3] 拉达伊. 焊接结构疲劳强度[M]. 郑朝云译,北京:机械工业出版社,1994.
- [4] IIW-Doe693-81. Design recommendation for eyelieloaded welded steel structures[J]. Weld World, 1982, 20(7/8): 153-165.
- [5] DS952 SPeecification for welding metal lie materials in Private works(German)[M]. Publ Deutehe Bundesbahn, Hannover/Minden, 1977.
- [6] Niemi E. Stress determination for fatigue analysis of welded components[M]. Cambridge: Abington Publishing, 1995.
- [7] Hobbacher A F. Recommendations for fatigue design of welded components[M]. Cambridge: Abington Publishing, 1996.
- [8] 张艳新,霍立兴,张玉凤等. 焊接接头疲劳评定的局部法研究现状[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 82-87.
- [9] 彭凡,姚云建,顾勇军. 热点应力法评定焊接接头疲劳强度的影响因素[J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 83-86.
- [10] 贾法勇,霍立兴,张玉凤等. 热点应力有限元分析的主要影响因素[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 27-30.
- [11] 孟立春,康旭,孙延军等. 7N01 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能[J]. 焊接学报, 2012, 3(2): 90-92.
- [12] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为与评定[M]. 北京:机械工业出版社, 2000: 221-352.

欢迎订阅 2018 年《电焊机》杂志

《电焊机》杂志是中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、《中文核心期刊数据库》收录期刊、“英国《科学文摘》(INSPEC)来源期刊”“俄罗斯《文摘杂志》收录期刊”“美国《剑桥科学文摘》(CSA)收录期刊”“波兰《哥白尼索引》(IC)”收录期刊等。各地邮局均可订阅,邮发代号:62-81,订价:15元/月,180元/年。

联系电话:028-83267908

联系人:黄秀艳

E-mail:bj@toweld.com