

引用格式: 廖祥雲, 王瑞杰, 刘国寿, 等. 7075/6061 铝合金 TIG 焊搭接接头疲劳性能评估[J]. 航空材料学报, 2025, 45(1): 44-52.

LIAO Xiangyun, WANG Ruijie, LIU Guoshou, et al. Fatigue property evaluation of 7075/6061 aluminum alloy TIG welded overlap joints[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(1): 44-52.

7075/6061 铝合金 TIG 焊搭接接头疲劳性能评估

廖祥雲¹, 王瑞杰^{1*}, 刘国寿², 赵平林¹, 常亚光¹, 王钟德¹

(1. 昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650500)

摘要: 对 7075/6061 铝合金 TIG 角焊缝搭接试件进行恒幅疲劳测试, 根据热点应力法与临界距离法细节分别建立有限元应力应变分析模型, 在模型中提取最大主应力变化范围进行分析。基于有限元应力应变分析结果并结合 IIW 推荐的 *S-N* 曲线估算不同载荷下焊缝接头的疲劳寿命。结果表明: 试件主要在 7075 侧焊趾处断裂, 而有限元模型中最大应力应变集中部位均位于 7075 侧焊趾, 两者基本一致。预测寿命与实际寿命对比可知, 在低周疲劳范围内热点应力法在进行板厚修正的基础上可较好地预测 TIG 焊件的疲劳寿命, 且预测结果误差均在 2 个因子范围内。临界距离法中点法和线法均能对热点应力进行预测, 其中点法预测精度更高, 线法预测精度稍差。

关键词: TIG 焊; 热点应力法; 临界距离法; 疲劳寿命; 有限元分析

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2023.000019

中图分类号: V261.3⁺4; TG407

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)01-0044-09

Fatigue property evaluation of 7075/6061 aluminum alloy TIG welded overlap joints

LIAO Xiangyun¹, WANG Ruijie^{1*}, LIU Guoshou², ZHAO Pinglin¹,
CHANG Yaguang¹, WANG Zhongde¹

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. School of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Constant-amplitude fatigue tests were conducted on overlap specimens of 7075/6061 aluminum alloy TIG fillet welds. Subsequently, detailed finite element models were developed based on both the hot spot stress method and the critical distance method. The range of maximum principal stress variation was from these models as a fatigue evaluation index for further analysis. By combining the results of finite element stress-strain analysis with the *S-N* curve recommended by the International Institute of Welding (IIW), the fatigue lives of the weld joints under various loadings were estimated. Testing revealed that specimens primarily fractured at the weld toes on the 7075 side. The maximum stress-strain concentration points in the finite element model were located at the weld toe on the 7075 side, aligning closely with the actual fracture locations. By comparing the predicted fatigue lives with the actual test results, it was determined that the hot spot stress method can predict the fatigue life of TIG welds more accurately. After correcting for plate thickness, the prediction errors were within a factor of two in the low-cycle fatigue range. Both the point method and the line method within the critical distance method can predict hot spot stress, but the point method yields more precise results than the line method.

Key words: TIG welding; hot spot stress method; critical distance method; fatigue life; finite element analysis

铝合金因质量轻, 在汽车工业、航空航天等领域广泛应用, 一直被称为“希望金属”^[1]。相关研

究表明到 2030 年我国的铝合金使用量将达到五千四百万吨, 在轻型汽车等行业的覆盖面将进一步扩

大^[2]。7075 高强铝合金因同时具有高强度与高韧性,在航空航天工业领域苛刻的服役条件下,获得广泛使用^[3]。6000 系铝合金的主要特点是优异的耐腐蚀性,常用于发动机罩板等,是一种典型的可变形热处理合金^[4]。

7000 系与 6000 系铝合金焊接时最常用的方法是 TIG 焊、MIG 焊、激光焊等^[5-7]。但使用熔焊时易产生较大残余应力,在航天等特殊领域会增加零部件断裂风险。TIG 焊接是 6061 铝合金焊接中最常用的工艺,而用这种方法焊接 7075 是相当困难的,因为它容易产生开裂和气孔缺陷影响疲劳强度^[8-9]。由此 7075 与 6061 铝合金的 TIG 焊接接头的疲劳性能受到重要关注,国内外学者对铝合金焊接接头性能进行了大量研究。Samiuddin 等^[10]对 5083 铝合金 TIG 焊接接头质量进行评估发现在热输入量为 1~2 kJ/mm、焊接电流为 270~320 A、焊接速度为 2~4 mm/s 时性能最佳。Kumar 等^[8]探讨了 TIG 焊接速度对 6061 铝合金焊缝区显微组织和力学性能的影响,发现焊接速度会影响熔合区的晶粒尺寸和抗拉强度。与同种金属相比,异种铝合金的焊接更能发挥不同金属的优势,工程上应用更加广泛,但不同金属间的性质差异会导致焊接变得困难,影响接头力学性能。廖传清等^[11]发现采用 BJ380A 和 ER4043 焊丝焊接 7075/5A06 异种铝合金时接头抗拉强度基本一致,但焊丝会影响焊缝区域的晶粒尺寸与硬度。Mehdi 等^[12]发现采用 ER5356 焊丝进行 TIG 焊得到的 7075/6061 铝合金试件压缩残余应力更低,接头质量更好,在 TIG 焊接过程中使用搅拌摩擦处理可以细化晶粒、提高抗

拉强度。除此之外,焊接接头的疲劳性能评估也一直是工程设计中的重点研究课题,在疲劳寿命预测中常采用名义应力法、热点应力法、临界距离等方法。李娟^[13]对 5A06 的焊接接头疲劳数据分析发现热点应力法可以降低预测数据的分散性,效果比名义应力法和体积法更好。临界距离法适用于评估复杂形状引起应力集中现象的结构疲劳强度,在循环载荷下可以预测焊接接头的失效位置^[14]。然而,针对 7075/6061 铝合金 TIG 焊接疲劳性能与寿命预测的报道相对较少,实际应用中这种焊接件作为航空航天承载部位评估疲劳性能也是十分重要。

本工作对填充 ER5356 焊丝的 7075/6061 铝合金 TIG 角焊缝搭接试件进行恒幅疲劳测试,分析其疲劳性能,探讨失效方式。利用有限元应力应变分析并结合热点应力法和临界距离法进行疲劳寿命预测,并与实验寿命进行对比分析。

1 实验材料与方法

实验选用 3 mm 厚的 7075 与 6061 铝合金薄板,采用 ER5356 焊丝,3 种材料的化学成分如表 1^[15-16]所示。将制备好的 TIG 角焊缝搭接试件沿垂直于焊缝方向进行切割后,所得试件尺寸见图 1。随机抽取 2 个试件利用万能材料试验机测得其平均抗拉强度为 188 MPa。在 MTS809 疲劳试验机上采用 ramp 波形、频率 10 Hz 的载荷进行恒幅疲劳测试,测试中在夹持端分别放置两块等厚垫片。

表 1 材料化学成分(质量分数/%)^[15-16]
Table 1 Chemical compositions of materials (mass fraction/%)^[15-16]

Material	Zn	Mg	Cu	Si	Cr	Fe	Mn	Ti	Al
7075	5.1-6.1	2.1-2.9	1.2-2.0	≤0.4	0.18-0.28	≤0.5	≤0.3	≤0.2	Bal.
6061	0.25	0.8-1.2	0.15-0.4	0.4-0.8	0.04-0.35	0.7	0.15	0.15	Bal.
ER5356	≤0.1	4.5-5.5	≤0.1	≤0.25	0.05-0.2	≤0.4	0.05-0.2	0.06-0.2	Bal.

2 结果与分析

疲劳测试结果如表 2 所示,大部分断裂位置位于 7075 铝合金侧,裂纹从焊趾处萌生,沿板厚度方向扩展。编号 W03、W07 试件的 6061 侧与 7075 侧均在焊缝处断裂,断裂时产生严重歪曲变形;Y05、Y06 试件断裂位置先后顺序有差异,6061 侧

均是从焊缝位置断裂,7075 侧均在焊趾位置断裂。3 种断裂方式如图 2。

在双对数坐标下拟合 7075 侧断裂试件的疲劳载荷-寿命关系,即 $S-N$ 曲线。拟合结果如图 3 所示,图中名义应力为实验载荷除以板横截面积。可以看出名义应力与疲劳寿命间呈现较好的线性关系,拟合式为 $S \cdot N^{0.303} = 10^{3.306}$,得到其疲劳极限为

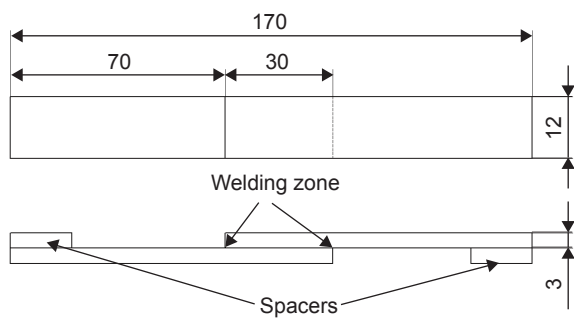


图 1 7075/6061 铝合金焊接试件尺寸

Fig. 1 Dimensions of 7075/6061 aluminum alloy welding specimens

约 24.93 MPa, 图 3 中直线为拟合结果。

3 有限元应力分析与疲劳寿命预测

3.1 基于热点应力法的疲劳寿命预测

3.1.1 有限元模型的建立

热点应力法忽略了焊缝缺陷和结构等因素, 主要考虑接头几何和载荷条件。该方法首先需要确立参考点, 然后通过这些参考点的应力外推至焊趾来确定结构热点应力。IIW^[17] (international institute of welding, IIW) 推荐标准中的热点类型有两种: a 类热点和 b 类热点, 如图 4。

本工作 TIG 焊搭接试件为 a 类热点, 因此以距离热点 $0.4t$ 和 $1.0t$ (t 为板厚) 为参考点进行线性外

表 2 疲劳实验结果
Table 2 Results of fatigue tests

Number	Average load/N	Load amplitude/N	Life/cycle	Fracture position
W01	3300	2800	4037	Weld toe on 7075 side
W08	3300	2400	9951	Weld toe on 7075 side
W03	3300	2200	6676 (break at the seam time)	Weld seam on 7075 side, weld seam on 6061 side
W05	3300	2000	14881	Weld toe on 7075 side
W06	3300	1800	14743	Weld toe on 7075 side
W07	3300	1600	14504 (break at the seam time)	Weld seam on 7075 side, weld seam on 6061 side
W09	3300	2600	8099	Weld toe on 7075 side
W10	3300	1400	59627	Weld toe on 7075 side
W12	3300	1500	21521	Weld toe on 7075 side
Y01	3300	1200	79611	Weld toe on 7075 side
Y02	3300	1700	29143	Weld toe on 7075 side
Y03	3300	1000	145616	Weld toe on 7075 side
Y04	3300	2900	6150	Weld toe on 7075 side
Y05	3300	3000	7144	Weld toe on 7075 side (firstly)
			7144	Weld seam on 6061 side (lastly)
Y06	3300	3200	442	Weld seam on 6061 side (firstly)
			506	Weld toe on 7075 side (lastly)
Y07	3300	3100	3449	Weld toe on 7075 side
Y08	3300	3150	3818	Weld toe on 7075 side
Y09	3300	1100	137043	Weld toe on 7075 side
Y11	3300	2100	9233	Weld toe on 7075 side
Y13	3300	1300	36482	Weld toe on 7075 side

Note: The W-series specimens in the table are from the same weldment with the same weld joint. The Y-series specimens are from another weldment. The same welding process is used for both series. As shown in Fig.2 (a), when the specimen is broken, two weld seams are almost broken at the same time. Two brittle sounds are heard in a moment, so it is difficult to distinguish the fracture sequence.

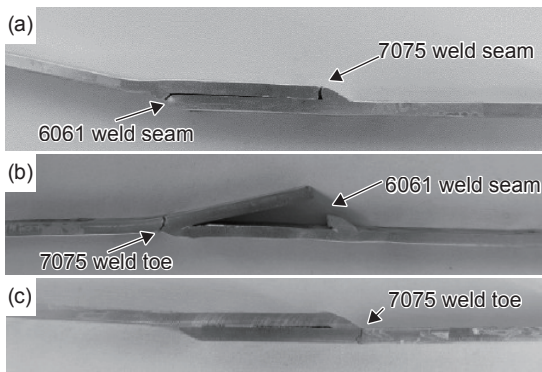


图 2 试件断裂位置 (a)W07 号试件; (b)Y06 号试件; (c)Y13 号试件

Fig. 2 Fracture positions of the specimens (a)W07 specimen; (b)Y06 specimen; (c)Y13 specimen

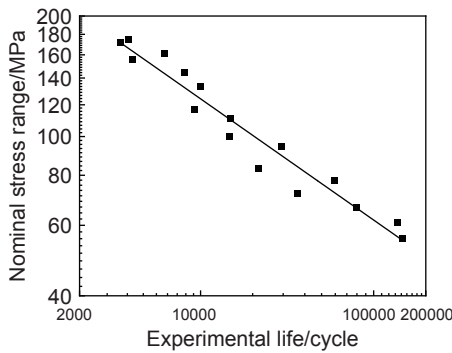


图 3 7075 侧断裂试件 S-N 曲线

Fig. 3 S-N curve of 7075 side fracture specimens

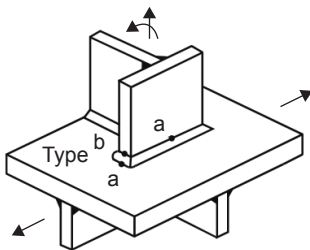


图 4 热点类型

Fig. 4 Hot spot type

推^[18]。采用有限元方法可以准确提取外推点处的热点应力,但有限元模型对网格的敏感性要求较高。根据 IIW 推荐 a 类热点在使用线性外推公式时,平面单元精细网格划分的长度必须小于 $0.4 \times t \times t$,模型网格长度可取 3.6 mm。肖东涛^[19]分析了网格密度对两点外推(式(1))与三点外推(式(2))的影响程度,发现网格越密,不同外推公式之间的差值越小,网格密度小到一定程度时外推公式的选择几乎不会影响热点应力的大小。综合考虑在目标节点附近使用尺寸为 0.075 mm 的网格,后续热点应力的计算仅采用两点外推,如图 5 所示。

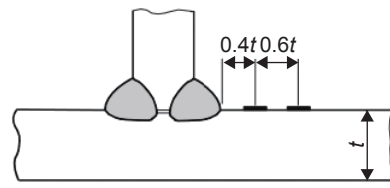


图 5 两点外推方式

Fig. 5 Two-point extrapolation method

$$\sigma_{hs} = 1.67 \cdot \sigma_{0.4t} - 0.67 \cdot \sigma_{1.0t} \quad (1)$$

$$\sigma_{hs} = 2.52 \cdot \sigma_{0.4t} - 2.24 \cdot \sigma_{0.9t} + 0.72 \cdot \sigma_{1.4t} \quad (2)$$

式中 σ_{hs} 为热点应力。分析使用 Abaqus 有限元软件,模型网格划分见图 6,采用 CPE4 平面应变单元,划分网格时提前确定 $0.4t$ 和 $1.0t$ 处的外推节点。7075、6061、ER5356 的材料属性见表 3^[20-22]。为了简化模型假设试件材料是均匀的,忽略热影响区的影响,角焊缝处赋予 ER5356 焊丝,母材处分别赋予 7075 和 6061 的材料属性(见图 7)。

3.1.2 疲劳寿命预测

热点应力法需要用到式(3)所示的 S-N 曲线进行疲劳寿命预测^[19]:

$$\Delta\sigma_{hs}^m \cdot N = C \quad (3)$$

式中: m 为材料 S-N 曲线的斜率; N 为疲劳循环次

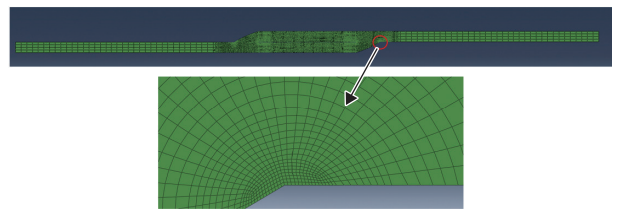


图 6 热点应力法下的网格划分

Fig. 6 Grid division based on hot spot stress method

表 3 材料属性

Table 3 Material properties

Material	Modulus of elasticity/MPa	Poisson's ratio
7075 ^[20]	72800	0.33
6061 ^[21]	67800	0.33
ER5356 ^[22]	71400	0.31

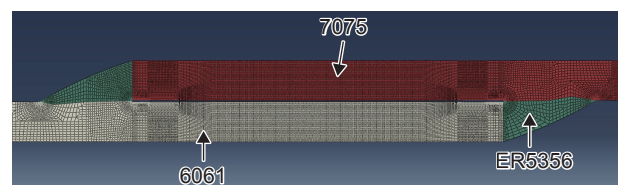


图 7 模型材料赋予

Fig. 7 Model material assignment

数; $\Delta\sigma_{hs}$ 为热点应力范围; C 为疲劳承载能力值 ($C=2 \times 10^6 \times FAT^m$); FAT 值是疲劳寿命为 2×10^6 次时对应的疲劳强度等级值。

IIW^[17] 推荐标准中的抗疲劳评估表将热点应力法的焊接结构细节分为 9 类, 本实验试件为角焊缝单轴拉伸件, 在疲劳寿命预测时铝合金采用 FAT 值为 40 的 $S-N$ 曲线, 曲线斜率为 3。IIW 推荐标准中提到板厚小于参考板厚 (25 mm) 时可以不考虑板厚效应, 但本次焊接试件较薄且在实际工程中板厚较薄的情况会对焊接件的疲劳寿命造成影响, 根据王文静等^[23] 的研究可知, 在板厚小于参考板厚的情况下, 疲劳强度随着主板厚度的增加而明显减小, 修正过的 $S-N$ 曲线在疲劳寿命评估时有更好的精度。可以采用 IIW 建议的式 (4) 对 $S-N$ 曲线进行修正^[24]。

$$f(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t_{eff}} \right)^n \quad (4)$$

式中: t_{ref} 为参考板厚; n 为板厚修正系数, IIW 推荐值为 0.3; t_{eff} 的取值受板厚效应影响 (如图 8 所示), 当 $L/t > 2$ (L 为搭接长度) 时, 可以取 $t_{eff} = t$ 。

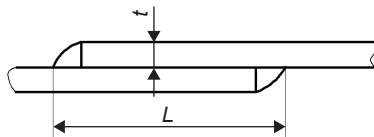


图 8 板厚效应示意图

Fig. 8 Schematic diagram of plate thickness effect

寿命预测采用式 (5):

$$\Delta\sigma_{hs}^m \cdot N = 2 \times 10^6 \cdot [FAT \cdot f(t)]^m \quad (5)$$

近年来许多研究人员对热点应力法进行大量研究, 在试件仅承受单轴拉伸载荷作用时, 最大主应力方向不会发生大幅度变化, 且基本垂直于焊缝, 可以用最大主应力作为热点应力^[19], 利用有限元分析提取 $0.4t$ 与 $1.0t$ 节点处的最大主应力范围 (图 9), 带入式 (1) 与式 (5) 中可求得预测寿命。从图 10 中可以看出预测寿命与实验寿命一致性较好, 预测结果误差均在 2 个因子线以内, 可以认为预测结果较好。

3.2 基于临界距离法的疲劳性能评估

3.2.1 临界距离法的定义及模型建立

Neuber^[25] 最早发现缺口根部应力场分布会对疲劳寿命造成影响, 并非由缺口处的最大应力点决定, 用应力集中部位的一定区域内的平均应力作为评估疲劳寿命的参数。目前使用的临界距离理论

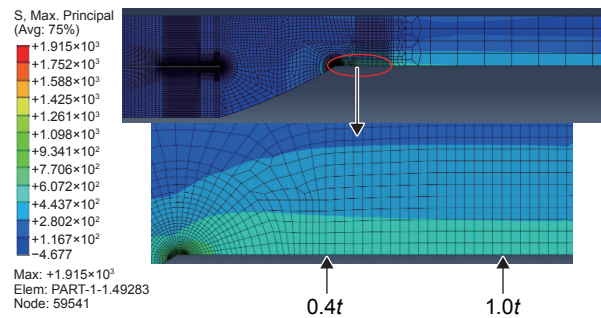


图 9 W09 号试件最大主应力云图

Fig. 9 Nephogram of the maximum principal stress of specimen W09

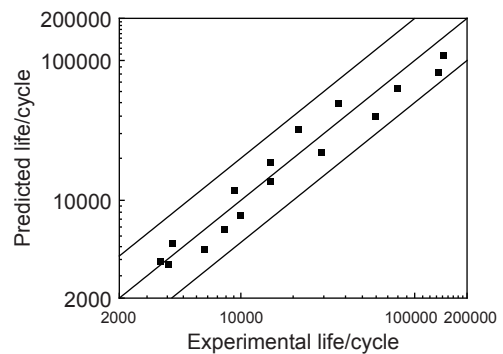


图 10 热点应力法寿命预测结果

Fig. 10 Life prediction results of hot spot stress method

都是 Taylor 进行研究和整理出来的^[26], 它作为局部法之一受到 IIW 的普遍重视, 常用其中的点法与线法进行疲劳评定。

点法认为在聚焦路径上, 与缺口根部距离为 $L/2$ (此处 L 为特征长度参数) 的应力等于临界应力时材料发生失效:

$$\sigma(L/2) = \sigma_0 \quad (6)$$

线法认为在聚焦路径上, 从缺口根部到距离缺口 $2L$ 的这一段路径上的平均应力等于临界应力时材料发生失效:

$$\frac{1}{2L} \int_0^{2L} \sigma(r) dr = \sigma_0 \quad (7)$$

临界距离法的关键在于路径选择和特征长度参数 L 的求取, 聚焦路径选取应与裂纹扩展至试件断裂的方向一致, 以最大主应力作为特征应力^[27], 特征长度可以通过修正的 Peterson 公式^[28] 近似计算:

$$L = \left(\frac{270}{R_{eL}} \right)^{1.8} \quad (8)$$

式中: R_{eL} 为材料的屈服强度, 由于试件在 7075 侧焊趾处发生断裂, 此处取 7075 铝合金的屈服强度 493.4 MPa 进行计算。得到的特征长度参数 L 为

0.338 mm。

3.2.2 疲劳强度评估

在 Abaqus 有限元软件环境中进行分析得到最大主应力云图(图 11), 模型的最大主应力在 7075 侧焊趾处, 图中红色实线为求解应力路径方向, 起点为最大主应力的最大值点。分别绘制出该路径上第一、二个载荷步时最大主应力随距离的变化曲线(图 12), 可以求得在距离原点 $L/2$ 处的最大主应力值和 0 到 $2L$ 范围内的最大主应力平均值, 点法与线法的疲劳性能预测结果如表 4。

结合疲劳实验及有限元仿真数据, 得到采用不同方法的 $S-N$ 曲线:

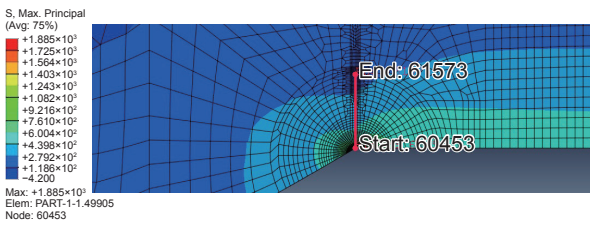


图 11 W09 号试件最大主应力云图

Fig. 11 Nephogram of the maximum principal stress of specimen W09

点法:

$$S \cdot N^{0.303} = 10^{3.877} \quad (9)$$

线法:

$$S \cdot N^{0.303} = 10^{3.880} \quad (10)$$

由图 13 可见, 采用点法与线法的模拟结果与实验所得 $S-N$ 曲线相关系数很接近。由式(9)、(10)计算出在 2×10^6 次循环次数下点法对应的疲劳强度约为 92.85 MPa, 线法对应的疲劳强度约为 93.5 MPa,

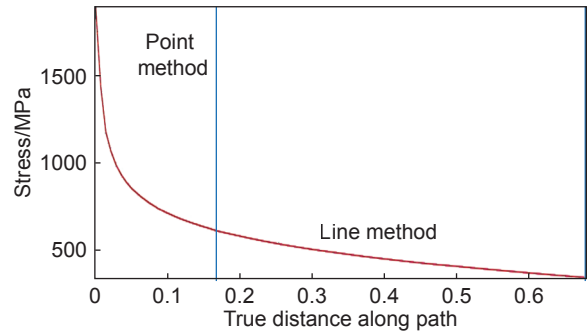


图 12 W09 号试件聚焦路径上第一个载荷步应力与距离的关系

Fig. 12 Relation between the stress and distance of the first load step on the focusing path of specimen W09

表 4 试件疲劳强度实验值与计算值对比

Table 4 Comparison between test value and calculated value of fatigue strength of specimens

Number	Nominal stress/MPa	Hot spot stress/MPa	Fatigue strength/MPa		Relative error/%	
			Point method	Line method	Point method	Line method
W01	155.56	558.79	579.21	583.48	3.65	4.42
W08	133.33	479.31	496.8	500.48	3.65	4.42
W05	111.11	399.14	413.72	416.77	3.65	4.42
W06	100	359.22	372.35	375.10	3.65	4.42
W09	144.44	518.88	537.84	541.81	3.65	4.42
W10	77.78	279.40	289.61	291.74	3.65	4.42
W12	83.33	299.35	310.29	312.58	3.65	4.42
Y01	66.67	239.48	248.23	250.07	3.65	4.42
Y02	94.44	339.27	351.66	354.26	3.65	4.42
Y03	55.56	199.57	206.86	208.38	3.65	4.42
Y04	161.11	578.75	599.90	604.32	3.65	4.42
Y07	172.22	618.66	641.27	646.00	3.65	4.42
Y08	175	628.64	651.61	656.42	3.65	4.42
Y09	61.11	219.52	227.55	229.23	3.65	4.42
Y11	116.67	419.10	434.41	437.61	3.65	4.42
Y13	72.22	259.44	268.92	270.90	3.65	4.42

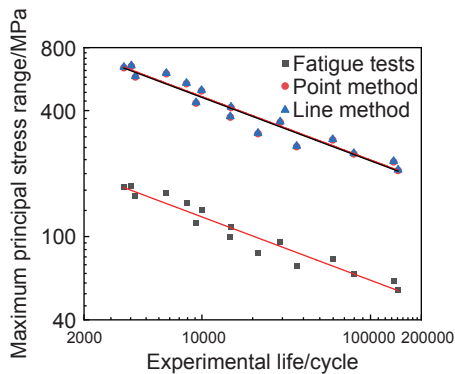


图13 不同疲劳评估方法的 S-N 曲线

Fig. 13 S-N curves of different fatigue evaluation methods

这种试件搭接接头对两种方法的依赖性较小。

从表4中可以看出点法与线法均可以对热点应力范围进行预测,两者的精确度相差不大,点法误差仅有3.65%,虽然线法考虑了应力梯度的影响,但此刻它的误差相对更大。这一点与Crupi等^[29]对5083铝合金的对焊和十字焊接接头疲劳强度研究结果相同,他们将临界距离法与应力平均法等4种方法的计算结果对比,发现线法与点法的误差接近,同样线法的误差更大,这种情况是可能存在的。不同试件的点法误差与线法误差一致,结合文献[30]的实验分析可知,这是由于试件尺寸、模型网格尺寸一致且进行的是线弹性分析引起的。

4 讨论

从前文疲劳测试部分可以看出7075/6061异种铝合金焊缝表面无明显缺陷,大部分试件在7075侧焊趾断裂,且实验测得的S-N呈较好的线性关系,这些结果表明此次焊接工艺的焊接质量相对稳定。焊接接头最大抗拉强度约为188 MPa,6061与7075铝合金母材的抗拉强度分别为310 MPa和572 MPa,焊接的强度仅达到7075母材的32%左右,抗拉强度和疲劳强度都发生大幅度衰减。但文献[7]中的结果显示6061铝合金TIG焊疲劳载荷达到抗拉强度的90%时寿命仍能接近 1×10^5 次。与同种金属焊接相比,不同材料之间的物理性质差异可能是导致焊缝处疲劳强度低的主要原因,疲劳实验有6061焊缝断裂的情况发生,推测原因是异种金属焊接工艺不够稳定导致的。

文献[13]表明6061/7075异种铝合金采用ER5356焊丝进行TIG焊接会产生少量 Al_2CuMg 等金属化合物,本工作在有限元应力分析时为了简化模型没有考虑焊缝处组织影响。Wang等^[31]对

铝合金TIG焊件的残余应力研究发现焊接后的板材被切割成12 mm宽的小件时,残余应力会释放约70%。临界距离法考虑了应力梯度和缺口效应,热点应力法使用的S-N曲线在一定程度上考虑了焊接工艺和残余应力等因素的影响^[23]。缺陷大小、位置等因素都可能成为疲劳裂纹根源,但这些微小缺陷在有限元中精确建模较为困难。实际焊接中每个试件的残余应力都会有差异,因此,为简化分析,在有限元分析时没有考虑这些缺陷和残余应力造成的影响。这些因素的存在也是图10中预测寿命与实际寿命有一定偏差的原因之一。

临界距离法可以用来评估疲劳强度,其模拟结果与热点应力法相同,但目前IIW推荐标准等尚未规定临界距离法的FAT值(疲劳等级),无法单独使用该方法进行疲劳寿命的评估。许多研究人员常用的方法是将临界距离理论结合Walker等效应变计算公式^[32]或双参数临界界面法^[33]进行疲劳寿命预测,这样使得疲劳寿命预测更加复杂化。结合本工作的有限元分析结果看,热点应力法沿与焊缝垂直方向进行线性外推(应力集中处往右取),临界距离点法沿试件断裂位置进行取点(应力集中处向试件内部取),本质上都是向外取点且两者的取值相差不大。结合表4的分析数据看,在无法使用热点应力法进行线性外推的情况下,使用热点应力法的FAT值对临界距离法进行寿命预测也是一种可行的方案,但在后续还需要理论上的证明。

5 结论

(1)7075/6061异种铝合金TIG焊接有3种疲劳失效情况,但主要是7075侧焊趾断裂失效,有限元分析结果显示7075侧焊趾产生较大的应力应变集中,这与实验断裂部位基本一致。在本疲劳实验中没有在6061焊趾处断裂的情况,但所有试件均在7075侧焊缝附近断裂,可以看出该侧强度更低。

(2)进行板厚修正后,采用热点应力法进行疲劳寿命预测时发现预测结果误差均在2个因子线之内且趋近于一条直线,可以认为此法的预测结果较为准确。

(3)临界距离法能有效预测试件的热点应力范围,所有试件点法与线法的误差相同且都在5%以内,线法的误差比点法略大。

参考文献:

[1] SAEVARSDOTTIR G, KVANDÉ H, WELCH B J. Alu-

- minimum production in the times of climate change: the global challenge to reduce the carbon footprint and prevent carbon leakage[J]. *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2020, 72(1): 296-308.
- [2] LI S P, ZHANG T A, NIU L P, et al. Analysis of the development scenarios and greenhouse gas (GHG) emissions in China's aluminum industry till 2030[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125859.
- [3] OLA O T, DOERN F E. Fusion weldability studies in aerospace AA7075-T651 using high-power continuous wave laser beam techniques[J]. *Materials & Design*, 2015, 77(15): 50-58.
- [4] TRZEPIECIŃSKI T, NAJM S M, OLEKSIK V S, et al. Recent developments and future challenges in incremental sheet forming of aluminium and aluminium alloy sheets[J]. *Metals*, 2022, 12(1): 124.
- [5] 陈轩, 李萌蘂, 卜恒勇等. 7系铝合金焊接技术的现状及展望[J]. *材料导报*, 2023, 37(13): 21010106.
CHEN X, LI M N, BU H Y, et al. Research status and progress on the welding technologies of 7××× series aluminum alloy[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(13): 21010106.
- [6] ZHAO Y Q, ZHAN X H, GAO Q Y, et al. Research on the microstructure characteristic and tensile property of laser-MIG hybrid welded joint for 5A06 aluminum alloy[J]. *Metals and Materials International*, 2020, 26(3): 346-359.
- [7] 李敬勇, 马建民. 焊接工艺方法对 6061-T6 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2004, 24(3): 52-57.
LI J Y, MA J M. Effect of welding processes on fatigue properties of 6061-T6 aluminum welded joints[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2004, 24(3): 52-57.
- [8] KUMAR P, ARIF A, PRASAD A C V S, et al. Study of welding process parameter in TIG joining of aluminum alloy (6061) [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47(13): 4020-4025.
- [9] DWIVEDI U, TIWARI S, MISHRA A, et al. Comparative study of weld characteristics of friction stir welded joints on aluminium 7075 with autogenous TIG[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 22(4): 2532-2538.
- [10] SAMIYUDDIN M, LI J-L, TAIMOOR M, et al. Investigation on the process parameters of TIG-welded aluminum alloy through mechanical and microstructural characterization[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(4): 1234-1248.
- [11] 廖传清, 宿国友, 高艳芳, 等. 7075/5A06 异种铝合金 TIG 焊接头的显微组织和力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(1): 43-48.
LIAO C Q, SU G Y, GAO Y F, et al. Microstructure and mechanical properties of 7075/5A06 dissimilar aluminum alloy joints made by TIG welding[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(1): 43-48.
- [12] MEHDI H, MISHRA R S. Effect of friction stir processing on mechanical properties and heat transfer of TIG welded joint of AA6061 and AA7075[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(3): 715-727.
- [13] 李娟. 镁/铝合金焊接接头疲劳评定的热点应力法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
LI J. Study on hot spot stress approach for fatigue evaluation of magnesium alloy and aluminum alloy welded joints[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [14] SUSMEL L. The theory of critical distances: a review of its applications in fatigue[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(7): 1706-1724.
- [15] 杨智华, 杨尚磊, 姜亦帅, 等. 7075 高强铝合金激光填充丝焊接组织与力学性能研究[J]. *材料导报*, 2017, 31(12): 60-63.
YANG Z H, YANG S L, JIANG Y S, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welding joints of 7075 aluminum alloy with filler wire[J]. *Materials Reports*, 2017, 31(12): 60-63.
- [16] ZHANG H R, ZHAO H, WANG R, et al. Coupling influences of elevated temperature and strain rate on the behaviour of 6061-T6 aluminium alloy used as construction material[J]. *Structures*, 2022, 40: 596-606.
- [17] HOBACHER A F. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [18] 马青娜, 邵飞, 高磊. 铝合金焊接接头疲劳研究进展综述[J]. *建筑结构*, 2018, 48(增刊2): 1022-1026.
MA Q N, SHAO F, GAO L. Overview of research progress of fatigue of aluminum alloy welded joints[J]. *Building Structure*, 2018, 48(Suppl 2): 1022-1026.
- [19] 肖东涛. 基于热点应力法的全焊桁片焊接细节疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
XIAO D T. The fatigue performance analysis of welded detail of fully welded truss plate based on hot spot stress method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [20] 杨卓云, 樊博成, 李萧逸, 等. 7075 铝板弹性模量退化行为研究及回弹预测[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(18): 2241-2248.
YANG Z Y, FAN B C, LI X Y, et al. Recession of elastic modulus and prediction of springback for 7075 aluminum alloy sheets[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(18): 2241-2248.
- [21] BRAMMER A T, JORDON J B, ALLISON P G, et al. Strain-controlled low-cycle fatigue properties of extruded

- 6061-T6 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22(5): 1348-1350.
- [22] HASELHUHN A S, BUHR M W, WIJNEN B, et al. Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2016, 673: 511-523.
- [23] 王文静, 白锦仪, 刘伟. 基于热点应力法的焊接结构疲劳评估[J]. *北京交通大学学报*, 2017, 41(6): 82-87.
WANG W J, BAI J Y, LIU W. Fatigue assessment of weld structure based on the hot spot stress method[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2017, 41(6): 82-87.
- [24] NIEMI E, FRICKE W, MADDOX S J. Structural hot-spot stress approach to fatigue analysis of welded components: designer's guide [M]. Singapore: Springer Nature, 2018.
- [25] NEUBER H. Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1961, 28(4): 544-550.
- [26] DAVID T. The theory of critical distances: a new perspective in fracture mechanics[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [27] BELLETT D, TAYLOR D, MARCO S, et al. The fatigue behaviour of three-dimensional stress concentrations[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(3): 207-221.
- [28] 牛亚辉, 孙国芹. 局部法评定铝合金搅拌摩擦焊接头疲劳性能[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(3): 374-378.
NIU Y H, SUN G Q. Assessment of fatigue performance of friction stir welded joints with local approaches[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(3): 374-378.
- [29] CRUPI G, CRUPI V, GUGLIELMINO E, et al. Fatigue assessment of welded joints using critical distance and other methods[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2005, 12(1): 129-142.
- [30] 贺琦. 基于临界距离理论的焊接 T 型管节点疲劳性能的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
HE Q. Research on fatigue properties of welded T-tube joints based on critical distance theory[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2019.
- [31] WANG Q, WAN Z, ZHAO T, et al. Tensile properties of TIG welded 2219-T8 aluminum alloy joints in consideration of residual stress releasing and specimen size[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 1502-1520.
- [32] 辛朋朋, 胡绪腾, 宋迎东. 基于临界距离理论的 TC4 合金缺口试样低循环疲劳寿命预测[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(5): 1105-1112.
XIN P P, HU X T, SONG Y D. LCF life prediction for TC4 alloy notched specimens based on theory of critical distance[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(5): 1105-1112.
- [33] SUSMEL L. The modified Woehler curve method calibrated by using standard fatigue curves and applied in conjunction with the theory of critical distances to estimate fatigue lifetime of aluminium weldments[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(1): 197-212.

收稿日期: 2023-03-01; 录用日期: 2023-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(51065012)

通讯作者: 王瑞杰(1972—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为机械结构强度及现代机械设计理论与方法, 联系地址: 云南省昆明市昆明理工大学机电工程学院(650500), E-mail: wrj@kust.edu.cn

(本文责编: 王俊丽)