

2A12/6061 异种铝合金 TIG 搭接接头的疲劳性能

赵平林¹, 王瑞杰¹, 刘国寿², 廖祥雲¹

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

摘要: 对 3 mm 厚的 2A12/6061 异种铝合金板材进行搭接钨极惰性气体保护焊(TIG), 利用光学显微镜、显微硬度仪、扫描电镜和疲劳实验机等对接头的疲劳性能进行分析。在实验结果的基础上, 对搭接试样建立有限元模型, 采用热点应力法预测接头的疲劳寿命, 并与实验结果进行比较。结果表明: 焊缝区组织为均匀的等轴晶, 2A12 侧焊缝与母材熔合较差, 且与母材强度差异较大, 导致 2A12 侧焊趾处更容易产生冶金缺陷和较大的应力梯度, 进而加速疲劳裂纹的萌生; 在不同载荷水平下, 试件断裂位置均位于强度差异较大的 2A12 侧焊趾处, 呈脆-塑性复合断裂特征, 焊趾处冶金缺陷及焊缝局部强度差异为影响接头疲劳性能的主要因素。寿命预测结果表明: 采用考虑板厚效应的热点应力法预测寿命准确, 误差在两倍误差带内, 采用 IIW 推荐的 FAT40 S-N 曲线是安全可靠的。

关键词: 异种铝合金; TIG 焊; 疲劳强度; 热点应力法; 疲劳寿命

中图分类号: TG444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2024)02-0195-09

Fatigue properties of 2A12/6061 dissimilar aluminum alloy TIG welded lap joints

ZHAO Ping-lin¹, WANG Rui-jie¹, LIU Guo-shou², LIAO Xiang-yun¹

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

Abstract: Tungsten inert gas (TIG) welding was conducted on 3 mm thick 2A12/6061 dissimilar aluminum alloy plates, and the fatigue performance of the joints was analyzed using optical microscope, microhardness tester, scanning electron microscopy and fatigue testing machine. Based on the experimental results, a finite element model was established for the lap joint specimen, and the fatigue life of the joint was predicted using the hot spot stress method and compared with the experimental results. The results show that the microstructure of the weld zone is uniform equiaxed grains, and the fusion between the 2A12 side weld and the base metal is poor, with a significant difference in strength, resulting in metallurgical defects and large stress gradients at the 2A12 side weld toe, thereby accelerating the initiation of fatigue cracks. Under different load levels, the fracture location of the specimen is located at the 2A12 side weld toe with significant strength differences, exhibiting a brittle-plastic complex fracture characteristics. Metallurgical defects at the weld toe and local strength differences in the weld are the main factors that affect the fatigue performance of the joint. The fatigue life prediction results indicate that the hot spot stress method considering the plate thickness effect is accurate, with an error within a double error band. The FAT40 S-N curve recommended by IIW is considered safe and reliable.

Keywords: heterogeneous aluminum alloy; TIG welding; fatigue strength; hot spot stress method; fatigue life

由于汽车和航空工业等对于降低结构件的重量、减少燃油消耗的要求与日俱增, 这就导致对异种材料连接具有巨大需求^[1]。异种铝合金由于在强度、耐腐蚀性、可焊接性等方面存在差异, 使得它们在航空发

收稿日期: 2023-06-26 修订日期: 2023-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(51065012)

作者简介: 赵平林(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事机械结构疲劳强度研究, E-mail: 2190822439@qq.com。

通信作者: 王瑞杰(1972—), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 博士, 主要从事机械结构强度及现代机械设计理论与方法研究, 发表论文 50 余篇, E-mail: wrj@kust.edu.cn。

引用格式: 赵平林, 王瑞杰, 刘国寿, 等. 2A12/6061 异种铝合金 TIG 搭接接头的疲劳性能[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(2): 195-203.

ZHAO Ping-lin, WANG Rui-jie, LIU Guo-shou, et al. Fatigue properties of 2A12/6061 dissimilar aluminum alloy TIG welded lap joints[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(2): 195-203.

动机、飞机蒙皮、汽车车身等结构部位被广泛使用^[2]。然而要实现两种不同性能材料的连接比较困难。钨极惰性气体保护焊(Tungsten inert gas, TIG)被广泛用于不同类型金属的焊接,特别是铝合金,能应用于各种复杂的结构和载荷条件^[3-4]。

受到焊接工艺特点和组织熔合等因素影响,在焊接热过程中产生的焊后残余应力以及焊接缺陷,将导致焊件在循环载荷作用下极易产生疲劳裂纹^[5]。在熔焊工艺下,由于焊接参数的变化,接头将呈现出各异的残余应力分布,与此同时,熔合组织中形成的脆性树枝相和共晶相等缺陷^[6],会进一步加剧接头的缺陷,在这些因素共同作用下,将加速疲劳裂纹的形成与扩展^[6-7]。因此对异种铝合金接头进行疲劳寿命评估显得更为重要。Motrunich等^[8]采用搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)和TIG对1420/1460薄板接头的强度进行了研究,结果表明:FSW接头的疲劳强度优于TIG接头的疲劳强度。郑自芹等^[9]研究了5454-H24/6106-T6异种铝合金熔接极惰性气体保护焊(Melt inert-gas, MIG)接头的疲劳性能,发现焊缝余高和焊接缺陷是影响焊接接头疲劳性能的主要因素。Mabuwa等^[10]对AA6082-T651和AA8011-H14两种不同的铝合金,分别采用TIG和FSW进行连接,发现前进侧为AA6082的FSW接头比TIG接头具备更好的力学性能。Sarikka等^[11]发现异种金属焊接材料性能不匹配和强度不匹配对断裂行为起重要作用。王池权等^[12]以5A06-O/7A05-T6异种铝合金TIG对接接头为对象,研究了气孔缺陷和未熔合缺陷对接头疲劳性能的影响规律及机理,发现与气孔缺陷相比,未熔合缺陷边缘的应力集中效应更明显,更易导致疲劳裂纹萌生。这些研究结果共同表明,在焊接过程中,不同焊接方法、材料性能差异以及焊接缺陷等因素都会显著影响焊接接头的疲劳性能。

焊接结构疲劳性能常用的评估方法有名义应力法、缺口应力法、热点应力法等。Chang等^[13]比较了名义应力和缺口应力S-N曲线,发现名义应力的散射带指标高于缺口应力。王莘等^[14]运用等效结构应力

理论,首次针对铝合金十字接头角焊缝疲劳失效模式开展研究,表明十字接头焊趾和焊接根处应力影响各异,疲劳寿命预测与实验高度一致。王文先等^[15]采用热点应力法对镁合金接头进行寿命评估,认为IIW(International Institute of Welding)推荐的S-N曲线具有较好的安全系数。目前关于异种铝合金TIG搭接接头疲劳性能的研究较少,接头的疲劳断裂机理和失效模式仍不清楚。

本研究旨在通过硬度测试、金相观察、恒幅疲劳测试和疲劳断口观测,分析2A12/6061异种铝合金TIG搭接接头的微观组织和疲劳失效模式。进而,应用有限元分析方法研究接头不同区域的局部应力和应变分布。最后,利用热点应力法评估接头的疲劳性能,并与实验结果进行对比分析。

1 实验材料和方法

实验母材选取常用航空铝合金2A12-T4和6061-T6,板材厚度为3 mm。焊丝材料为3A21,直径为2 mm,母材和焊丝的化学成分及力学性能如表1和表2所示。采用TIG搭接的方式成形,焊接成形后的焊件如图1所示。采用线切割将试件切成几何尺寸和形状如图2的试样。随机选取试件进行静拉伸测试,测试时在试件两端分别加上垫片。对完好试样焊缝横截面进行打磨、抛光,使用Keller's腐蚀剂(95 mL HO₂+2.5 mL HNO₃+1.5 mL HCl+1 mL HF)腐蚀约30 s取出,用酒精清洗吹干后,利用4XC-MS型光学显微镜进行金相观测。采用KB30SRW型维氏显微硬度仪对试件横截面进行显微硬度测试,图3为焊接接头显微硬度测试测点布置图,施加载荷为500 g,沿焊缝每隔0.5 mm一个测试点,加载时间15 s,上下板各一排。在MTS809型疲劳实验机上对2A12-T4/6061-T6接头进行恒幅疲劳测试,加载波形为三角波,加载频率为10 Hz,首次疲劳拉伸的最大载荷为0.8R_m。对于疲劳测试后的试件,使用NOVA Nano SEM450型扫描电镜(SEM)对试件进行断口观察,并采用配套能谱仪(EDS)对焊缝区微观组织成分进行测试。

表1 母材及焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of the base metals and welding wire (mass fraction, %)

Materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
2A12-T4	0.4-0.8	≤0.7	3.8-4.9	≤0.15	0.8-1.2	≤0.25	Bal.
6061-T6	≤0.5	≤0.5	0.15-0.4	0.3-0.9	1.2-1.8	≤0.02	Bal.
3A21-O	≤0.6	≤0.7	≤0.2	1-1.6	≤0.05	≤0.1	Bal.

表 2 母材及焊丝的基本力学性能

Table 2 Basic mechanical properties of the base metals and welding wire

Materials	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa
2A12-T4	469	370
6061-T6	312	290
3A21-O	82	60

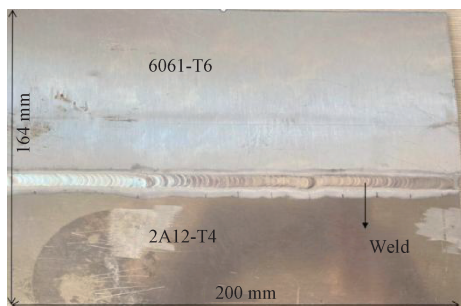


图 1 焊件的宏观形貌

Fig. 1 Macro morphology of welded parts

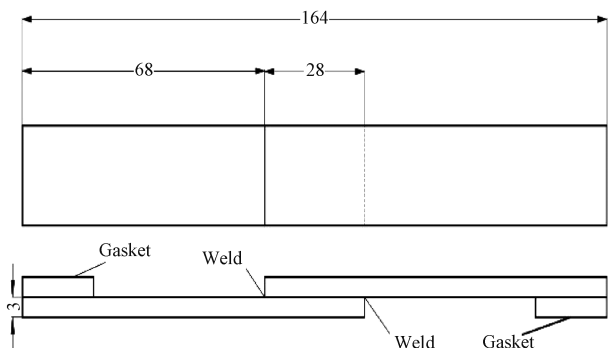


图 2 疲劳试样的尺寸示意图 (mm)

Fig. 2 Dimensional schematic diagram of fatigue specimen (mm)

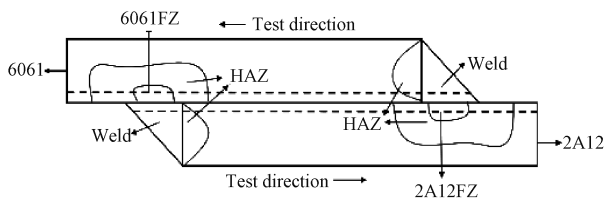


图 3 焊接接头显微硬度测试点位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the position of microhardness testing points for welded joints

2 实验结果与分析

2.1 显微组织分析

2A12/6061 搭接接头结构包括焊缝 (Weld)、热影响区 (Heat affected zone, HAZ)、焊缝融合区 (Fusion

zone, FZ) 以及母材 (Base material, BM), 图 4 为接头的显微组织。图 4(a) 为 2A12 侧焊根处显微组织, 焊缝为等轴晶粒, HAZ 区域的晶粒进一步长大, 为粗等轴晶, 在 FZ 处形成了粗大的板条状晶粒, 分析认为是由于 BM 与填充材料的再结晶温度有差异, 造成 BM 熔化后未能与焊丝及时熔合导致。在 2A12 侧焊趾处, 如图 4(b) 所示, 此时, 焊缝由等轴晶逐渐变成柱状晶, 上下晶界熔合较差, 且沿着熔池方向晶粒被明显拉长, 这将导致在 2A12 侧焊趾处容易存在冶金缺陷, 从而加速疲劳裂纹的萌生。图 4(c) 为 6061 侧焊趾处的显微组织, 从图中可以明显观察到, 焊缝的组织呈现均匀的等轴晶结构, 随着距离熔池越来越远, 晶粒逐渐展现出被拉长的趋势, 与此同时, 母材 (BM) 的组织则呈现均匀的柱状晶, 且这些晶体的方向与板长平行。在熔池内部, 界限模糊, 晶粒过渡均匀, 这表明 6061 侧的焊接区域具有较好的熔合性能。针对 2A12 侧焊缝融合区 (FZ) 的局部进行析出相能谱分析, 结果如图 5 所示。从分析结果可以明显观察到, FZ 的主要元素为 Al, 占比 77%, 其次为 Cu 元素, 占比 11.7%, 根据文献 [16] 的研究, 这是因为在高温熔化过程中, FZ 内的合金元素被稀释并重新分布, 从而产生了大量的 $\theta(\text{CuAl}_2)$ 相, 与此同时, 也存在少量的 $S(\text{CuMgAl}_2)$ 相, 这些析出相的存在将有效提升 FZ 的力学性能。

2.2 显微硬度分析

图 6 为焊接接头的典型维氏硬度分布, 从 2A12 到 6061 侧硬度值分布呈现明显的“W”形, 其中包括 BM、Weld、HAZ 和 FZ 4 个区域的显微硬度变化情况。2A12 和 6061 板 BM 平均硬度分别约为 127.09 和 66.59 HV0.5。上下两板 HAZ 存在较大差异, 相比 BM 显微硬度, 2A12 下降约 25%, 6061 下降 18%, 均存在软化现象。6061HAZ 显微硬度略高于焊缝, 通过文献 [17] 对 6 系铝合金的研究发现: 强化中间相 β' 和 β'' 的强化效果最弱, 在 HAZ 最中心位置起强化作用的是 β' 相, 它对硬度的贡献很小, 往往形成软化区。与此同时, 在 2A12 侧焊缝和 HAZ 之间的区域, 硬度差异较大, 在熔合阶段硬度存在跳跃现象, 其最大值基本与 BM 持平; 结合能谱分析, 这是由于 FZ 产生了具有强化作用的 $\theta(\text{CuAl}_2)$ 和 $S(\text{CuMgAl}_2)$ 相 [16], 提高了 FZ 的强度。而在 6061 侧焊缝与 HAZ 之间硬度差异较小, 这是由于 6061 中的强化相 $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ 的强化作用远远弱于 2A12 中的 θ 和 S 相。这就导致 2A12 侧接头局部强度差异较 6061 侧接头大。

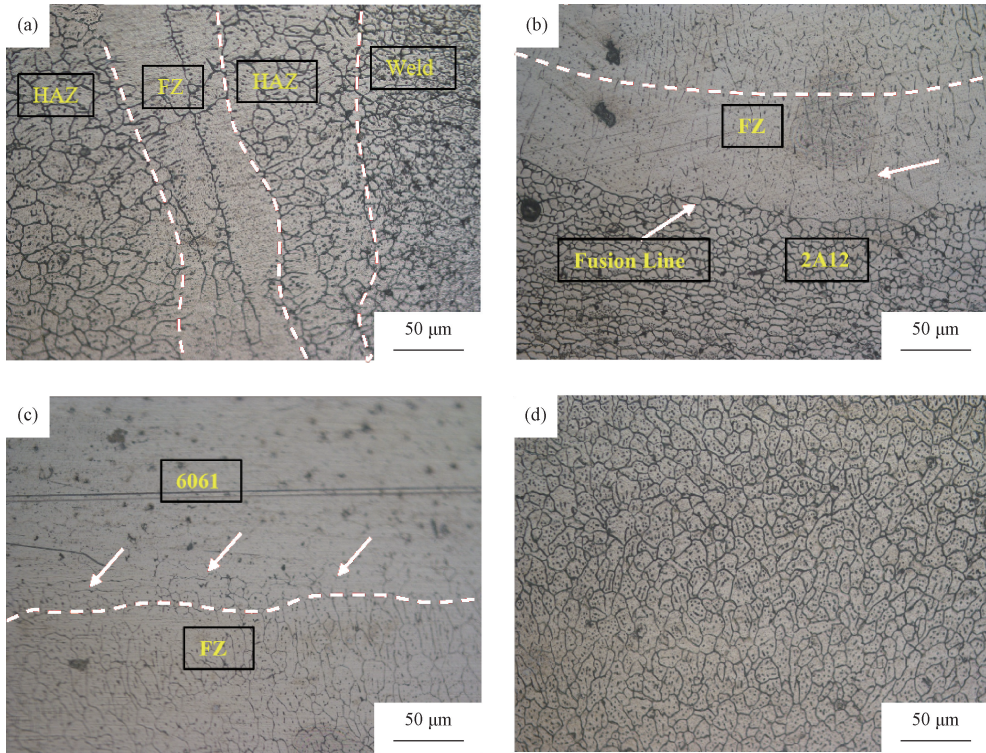


图4 2A12/6061接头的显微组织 (a) 2A12侧焊根; (b) 2A12侧焊趾; (c) 6061侧焊趾; (d) 焊缝

Fig. 4 Microstructure of the 2A12/6061 joints (a) 2A12 side weld root; (b) 2A12 side weld toe; (c) 6061 side weld toe; (d) weld

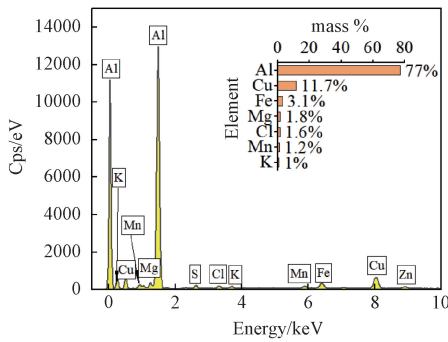


图5 2A12侧焊趾FZ能谱

Fig. 5 Energy spectrum of the fusion zone at the weld toe of 2A12 side

2.3 拉伸和疲劳测试结果

拉伸实验表明 2A12/6061 接头平均抗拉强度约为 120 MPa,断裂位置均位于母材强度较高的 2A12 侧焊趾处;疲劳试样的断裂位置同样位于 2A12 侧焊趾处。在双对数坐标轴下绘制出载荷 ($\Delta\sigma$) - 寿命 (N) 曲线,如图 7 所示,可见名义应力与实验寿命呈现较好的线性关系,拟合 $\Delta\sigma - N$ 曲线方程为: $\lg\Delta\sigma = 3.14 - 0.28\lg N$,拟合数据都在 97.5%置信带附近,表明疲劳实验数据具有较好的可靠性,焊接质量处于一个比较稳定的水平。疲劳测试结果表明,与母材相比,接头的疲劳强度有所下降。根据 IIW^[18] 规

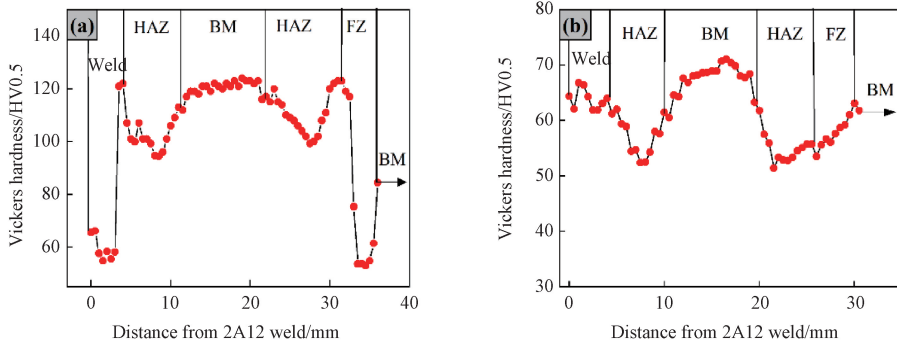


图6 2A12/6061接头的显微硬度 (a) 2A12侧硬度; (b) 6061侧硬度

Fig. 6 Microhardness of the 2A12/6061 joints (a) microhardness of 2A12 side; (b) microhardness of 6061 side

范,可计算出接头在 2×10^6 循环下的疲劳极限约为 23.9 MPa,仅为接头抗拉强度的 19.9%(此处名义应力为水平载荷与焊缝横截面积之比)。

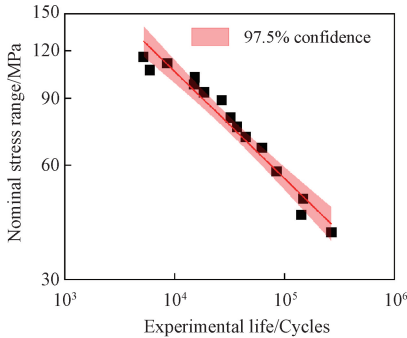


图 7 搭接接头的疲劳 $\Delta\sigma$ - N 曲线

Fig. 7 Fatigue $\Delta\sigma$ - N curves of overlap welded joints

2.4 疲劳断口分析

疲劳测试结果表明,2A12/6061 试件的疲劳断裂位置均位于 2A12 侧焊趾处。此处选取应力幅为 48.89 MPa 的试件进行 SEM 断口观察,结果如图 8 所示。从图 8(a)可以看出,断口整体平整,呈现脆断特征,未见明显的缺陷沟槽,断口可分为 3 个区域:疲劳源区、裂纹扩展区和瞬断区。图 8(b)为疲劳源区,疲劳源位于焊趾表面处,存在多个疲劳源,呈放射性向约 45° 方向延展,断口表面粗糙,存在撕裂棱,表明裂纹扩展速率较快。

图 8(c)为疲劳裂纹扩展区,该区域呈现出多个层层堆叠的小刻面,其方向与裂纹扩展方向基本一致。分析认为,在裂纹扩展过程中,受到循环载荷的作用,裂纹可能在晶界、晶粒以及基体交界处开始萌生,从而使裂纹扩展至附近各个晶面。随着裂纹的不断扩展,在该区域还可观察到与主裂纹垂直方向或近似垂直方向的二次裂纹,如图 8(c)箭头所示,这些二次裂纹形成于主裂纹尖端或侧壁处的应力集中区域,这些区域的应力超过了材料的强度极限,从而引发了二次裂纹的扩展。这些二次裂纹在一定程度上削弱了主裂纹尖端的应力状态,降低了应变能,从而在一定程度上延缓了疲劳断裂的发生^[19]。

图 8(d)为瞬断区形貌,当裂纹扩展到一定程度,试件不足以承受外部循环载荷,试样发生瞬间断裂^[19]。瞬断区断口表现为晶粒粗大而且形成块状物,并存在少量二次裂纹,在韧窝附近还存在被撕裂的孔洞和第二相破碎粒子,说明试件呈脆性断裂特征;此外还存在少量韧窝,表明试件同时伴随韧性断裂。因此,可以认为 2A12/6061 接头疲劳断裂模式

属于脆-塑性复合断裂。

3 热点应力法疲劳寿命评估

3.1 热点应力及外推法

热点应力法研究的是疲劳临界点附近的应力变化,该方法的基本思想是在临界疲劳点(热点)的分析中考虑了膜应力和弯曲应力,而忽略了非线性应力峰值^[20]。热点的位置一般在焊趾或者焊根处,这是结构应力最为集中的地方,同时也是裂纹萌生和扩展的地方。根据焊趾细节的不同,IIW 规范中将热点类型分为 3 类,如图 9 所示^[21]。目前热点应力评估方法主要分为 IIW 规范和船级规范两种,其中最常用的为 IIW^[18] 推荐的两点线性外推法,它是以离焊趾 0.4 t 和 1.0 t 两个应力点作为参考点来计算热点应力,如图 10 所示,其计算表达式为:

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

式中: σ_{hs} 为热点应力; $\sigma_{0.4t}$ 和 $\sigma_{1.0t}$ 为距离焊趾 0.4 t 和 1.0 t 的单向应力, t 为板厚。

3.2 数值模拟及寿命预测

目前,对于焊接结构件的热点应力 S - N 曲线有两大设计标准,IIW 和各国船级社对热点应力 S - N 曲线进行了大量的实验研究,给出了不同焊缝细节的热点应力 S - N 曲线。根据 IIW 推荐,对于单搭接接头推荐疲劳等级 FAT40 作为一条通用的 S - N 曲线。根据实际疲劳试样尺寸,建立有限元模型,由于热点应力法对网格敏感度很高,因此对模型局部进行精细化处理,参照 IIW 规范,网格单元尺寸小于 0.4 t ,采用平面应变单元,有限元模型及细节如图 11 所示。采用 IIW 推荐两点线性外推法,通过式(2)计算焊趾处的热点应力,得到 2A12/6061 接头的特征 S - N 曲线方程为:

$$\sigma_{hs} N^{0.26} = 10^{3.46} \quad (2)$$

式中: σ_{hs} 为热点应力幅; N 为疲劳寿命。

由于焊接结构的应力集中、板厚影响以及平均应力等因素会直接影响接头的疲劳行为,而采用热点应力的求解时,板厚对疲劳行为影响最为显著^[22]。在 IIW 规范中规定:当焊接结构的主板厚度大于参考板厚(25 mm)时,需要进行板厚修正,而小于则无需修正,在实际应用中,薄板焊接件也会对接头疲劳行为造成一定的影响。王文静等^[23]研究表明,对于修正板厚效应的 S - N 曲线在评估寿命时具有更好的精度。IIW 中建议板厚效应可采用式(3)对 S - N 曲线进行修正:

$$\lg N = \lg \bar{A} - m \lg [\Delta\sigma_{hs} (t_r/t_m)^n] \quad (3)$$

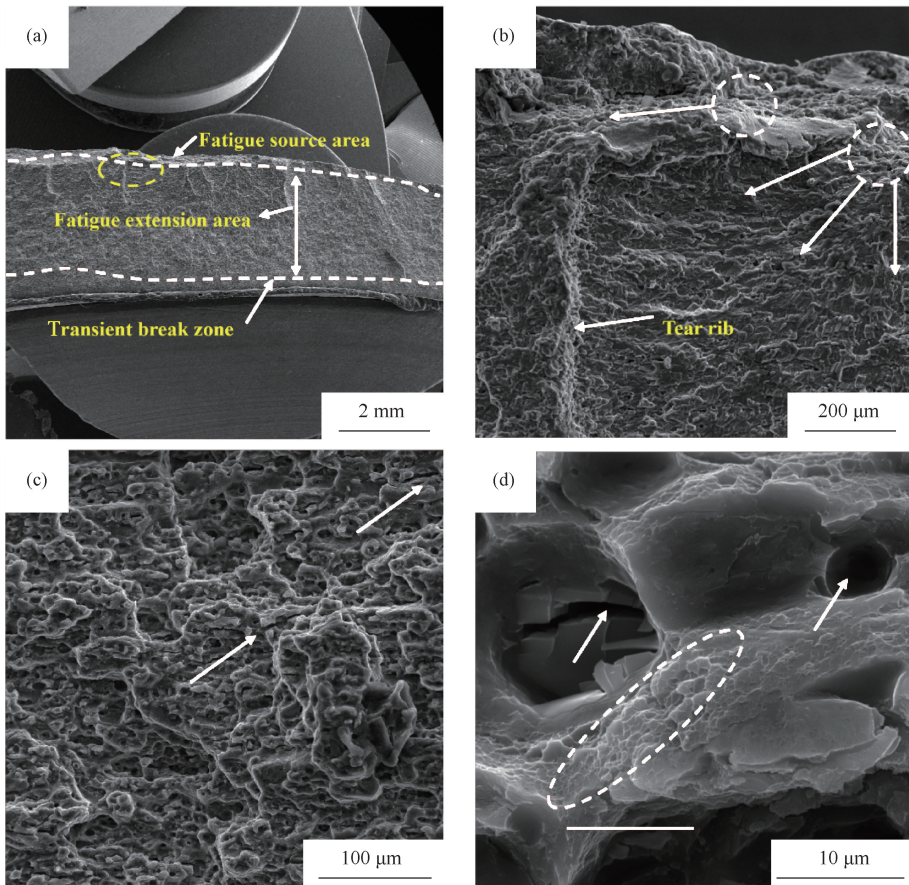


图8 疲劳断口的微观形貌 (a) 宏观断口形貌; (b) 疲劳源区; (c) 扩展区; (d) 瞬断区
 Fig. 8 Microscopic morphology of fatigue fracture surface (a) macroscopic fracture surface morphology;
 (b) fatigue source zone; (c) propagation zone; (d) final fracture zone

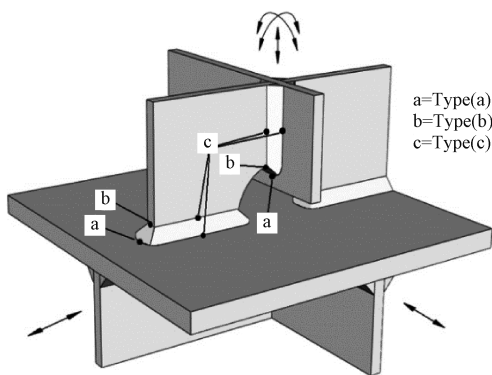


图9 热点应力类型^[21]
 Fig. 9 Hot spot stress type^[21]

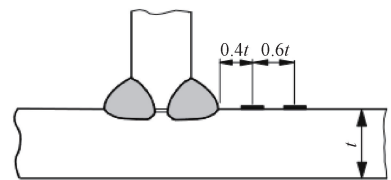


图10 线性外推示意图^[18]
 Fig. 10 Schematic diagram of linear extrapolation^[18]

式中: $\Delta\sigma_{hs}$ 为热点应力幅; N 为 $\Delta\sigma_{hs}$ 下的疲劳寿命; t_f 为参考板厚, 一般取 25 mm; m 为 $S-N$ 曲线指数; n 为板厚修正系数, 当研究细节为焊趾处时, $n=0.2$; 对于 t_m 取值, 如图 12 所示: 当 $L/t > 2$ 时 (L 表示焊趾之间的距离), $t_f = 0.5\Delta L$ 或者 $t_f = t$, 取两者的最大值。

采用修正板厚之后的 $S-N$ 曲线对 2A12/6061 搭

接头进行疲劳寿命预测, 并与未修正板厚的预测结果同实验结果进行比较, 如图 13 所示。结果发现, 在考虑修正板厚效应后, 疲劳寿命的预测结果均在两倍误差带内, 整体预测更精确。相比之下, 未修正的预测结果中, 仅有少数超出误差带, 修正后的预测结果与实验结果误差较小。值得注意的是, 尽管未修正和修正的预测结果之间存在一定差异, 但这种差异并不显著。因此, 可以得出结论认为板厚效应对于 2A12/6061 接头的疲劳行为具有一定程度的影响, 影响程度并不显著。

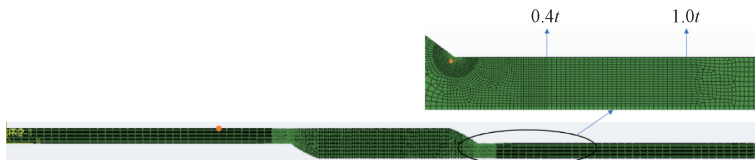


图 11 有限元模型及细节

Fig. 11 Finite element model and details

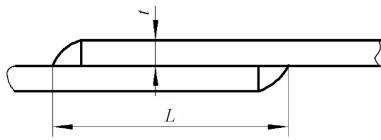


图 12 板厚效应示意图

Fig. 12 Schematic diagram of plate thickness effect

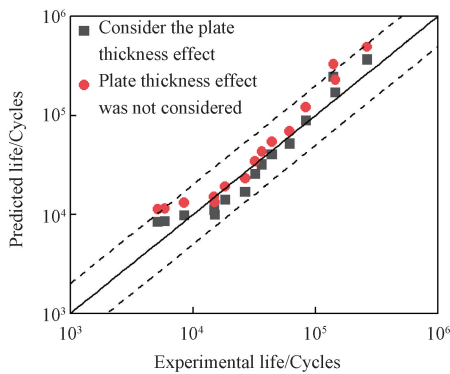


图 13 热点应力法预测疲劳寿命

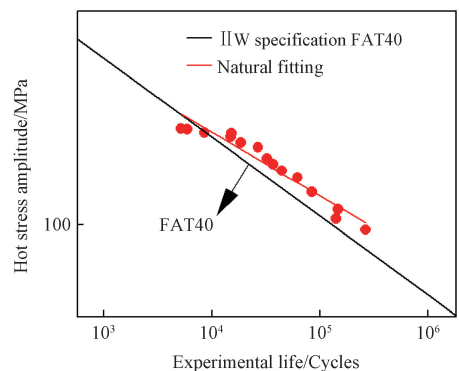
Fig. 13 Prediction of fatigue life by hot stress method

4 结果讨论

疲劳测试结果表明,2A12/6061 接头在 2×10^6 次循环下的疲劳强度约为 23.9 MPa,仅为接头抗拉强度的 19.91%。陈雨等^[24]对铜-钢电子束焊接头的疲劳特性研究发现,疲劳裂纹萌生有向异种金属强度较低的一侧发生。相关研究表明:焊缝局部强度不匹配已被确定为异种接头界面失效的主要原因^[25]。显微硬度是评估焊缝强度失配的一个重要参数。在考虑接头的显微硬度时,针对 2A12 侧母材与焊缝区以及热影响区(HAZ),硬度表现出两次跃升,最低值则在焊缝焊趾位置,这表明在焊趾和 HAZ 附近,焊缝局部强度存在不匹配的状态,这将导致在焊趾处产生较大的应力梯度。与此同时,2A12 侧焊趾处母材与焊丝熔合较差,这将导致在此处更容易产生冶金缺陷,而断口观测结果也证实了这一点。与之相比,同样受到应力集中影响的 6061 侧,由于焊缝熔合较好,焊缝区

域的强度失配较小,这就意味着 6061 侧接头具备更好的疲劳性能。因此,在相同外部载荷作用下,2A12 侧焊趾更易于成为疲劳破坏的发源地,而实际的疲劳测试结果也证实了这一观点。因此,针对 2A12/6061 异种铝合金接头,疲劳失效更倾向于在基体和焊缝结合强度差异较大的一侧。

在采用热点应力法预测疲劳寿命时,采用热点应力幅表征疲劳寿命的特征 $S-N$ 曲线,在经过板厚修正后,其预测结果贴近实验结果。然而,根据 IIW^[18] 推荐,热点应力特征 $S-N$ 曲线计算得到接头在 2×10^6 次循环下的疲劳强度为 FAT50,高于 IIW 推荐值,如图 14 所示。然而,IIW 所提倡的应力-寿命($S-N$)曲线是基于广泛的实验数据总结而得出的,具备一定的安全系数,结合实验来看,选取 IIW 推荐的 FAT40 的 $S-N$ 曲线评估 2A12/6061 异种铝合金接头的疲劳性能是比较合理的。

图 14 不同 $S-N$ 曲线Fig. 14 Different $S-N$ curves

5 结论

- 1) 焊缝组织为均匀的等轴晶,6061 侧接头熔合性优于 2A12 侧接头,且 2A12 侧接头焊缝与母材之间强度差异较大,导致在 2A12 侧接头处更容易产生冶金缺陷以及较大的应力梯度,进而加速疲劳裂纹的形成;
- 2) 焊趾处冶金缺陷及焊缝局部强度差异为影响接头疲劳性能的主要因素,在不同载荷条件下,试件

断裂位置均位于2A12侧接头焊趾处,呈脆-塑性复合断裂,失效位置倾向于基体和焊缝结合强度差异较大的一侧;

3) 考虑板厚效应的热点应力法预测准确,误差在两倍误差带内,采用IIW推荐的FAT40 S-N曲线安全可靠。

参 考 文 献

- [1] Correia A N, Braga D F O, Moreira P M G P, et al. Review on dissimilar structures joints failure[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 129(9): 105652.
- [2] Ren D, Zhao K, Pan M, et al. Ultrasonic spot welding of magnesium alloy to titanium alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2017, 126: 58-62.
- [3] Singh A K, Dey V, Rai R N. Techniques to improve weld penetration in TIG welding (A review) [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2): 1252-1259.
- [4] Muhammad H, Tauseef-ur R, Praveen K, et al. Experimental analysis on fatigue life assessment of dissimilar aluminum alloys weld joints under four-point rotating bending condition[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(9): 4408.
- [5] Zhang W C, Zhu M L, Wang K, et al. Failure mechanisms and design of dissimilar welds of 9% Cr and CrMoV steels up to very high cycle fatigue regime[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 113(8): 367-376.
- [6] Steuwer A, Peel M J, Withers P J. Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082: The effect of process parameters on residual stress[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 441(1/2): 187-196.
- [7] Aval H J. Microstructure and residual stress distributions in friction stir welding of dissimilar aluminium alloys[J]. *Materials & Design*, 2015, 87(15): 405-413.
- [8] Motrunich S, Klochkov I, Poklatsky A, et al. High cycle fatigue behaviour of thin sheet joints of aluminium-lithium alloys under constant and variable amplitude loading[J]. *Welding in the World*, 2020, 64(12): 1971-1979.
- [9] 郑自芹, 徐智宝, 张文亮, 等. 异种铝合金 MIG 焊接接头的疲劳破坏行为[J]. *兵器材料科学与工程*, 2022, 45(3): 99-104.
ZHENG Zi-qin, XU Zhi-bao, ZHANG Wen-liang, et al. Fatigue and fracture behavior of MIG welded joint of dissimilar aluminium alloys[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 45(3): 99-104.
- [10] Mabuwa S, Msomi V, Muribwathoho O, et al. The microstructure and mechanical properties of the friction stir processed TIG-welded aerospace dissimilar aluminium alloys[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46(1): 658-664.
- [11] Sarikka T, Ahonen M, Mougnot R, et al. Microstructural, mechanical, and fracture mechanical characterization of SA 508-Alloy 182 dissimilar metal weld in view of mismatch state[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2016, 145(2): 13-22.
- [12] 王池权, 石亮, 张祥春, 等. 焊接缺陷对异种铝合金 TIG 对接接头疲劳行为的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(7): 1505-1514.
WANG Chi-quan, SHI Liang, ZHANG Xiang-chun, et al. Influence of welding defects on fatigue behavior of dissimilar aluminum alloy TIG butt joint[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(7): 1505-1514.
- [13] Chang Y, Sun C, Qiu Y. Effective notch stress method for fatigue assessment of sheet alloy material and bi-material welded joints[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 151(6): 106745.
- [14] 王苹, 米莉艳, 于谊飞, 等. 7N01 铝合金十字接头抗疲劳设计[J]. *焊接学报*, 2019, 40(10): 20-24.
WANG Ping, MI Li-yan, YU Yi-fei, et al. Fatigue-resistant design of 7N01 aluminum alloy cross joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(10): 20-24.
- [15] 王文先, 李娟, 李晋永, 等. 基于热点应力法的 AZ31B 镁合金焊接接头疲劳评定[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(10): 52-56.
WANG Wen-xian, LI Juan, LI Jin-yong, et al. Fatigue evaluation on AZ31B magnesium alloy weld joints by hot spot stress approach[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(10): 52-56.
- [16] Chen C, Yin X, Liao W, et al. Microstructure and properties of 6061/2A12 dissimilar aluminum alloy weld by laser oscillation scanning[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14(5): 2789-2798.
- [17] Zhang M X, Wang C, Zhang S Y, et al. Enhanced aging precipitation behavior and mechanical properties of 6022 Al-Mg-Si alloy with Zr addition[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2022, 840(4): 142957.
- [18] Hobbacher A F. The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components-A comprehensive code recently updated[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(1): 50-58.

- [19] 周松,查涛,黄研清,等. 典型高速列车用 6N01 铝合金焊接接头的微观组织及疲劳性能[J]. 中国有色金属学报,2021,31(5):1253-1260.
ZHOU Song,ZHA Tao,HUANG Yan-qing, et al. Microstructure and fatigue performance of typical 6N01 aluminum alloy welded joints for high-speed trains[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(5):1253-1260.
- [20] Lee J M, Seo J K, Kim M H, et al. Comparison of hot spot stress evaluation methods for welded structures[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering,2010,2(4):200-210.
- [21] Aygül M, Al-Emrani M, Urushadze S. Modelling and fatigue life assessment of orthotropic bridge deck details using FEM[J]. International Journal of Fatigue,2012,40(7):129-142.
- [22] 彭凡,姚云建,顾勇军. 考虑热点应力梯度的焊接接头疲劳评定[J]. 机械工程学报,2010,46(22):65-69.
PENG Fan, YAO Yun-jian, GU Yong-jun. Fatigue assessment of welded joints considering hot spot stress gradient[J]. Journal of Mechanical Engineering,2010,46(22):65-69.
- [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 Wen-jing, BAI Jin-yi, LIU Wei. Fatigue assessment of weld structure based on the hot spot stress method[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2017,41(6):82-87.
- [24] 陈雨,周根树,詹腾,等. 铜-钢电子束焊接材料的疲劳特性[J]. 材料工程,2023,51(3):89-97.
CHEN Yu, ZHOU Gen-shu, ZHAN Teng, et al. Fatigue characteristics of copper-steel electron beam welding materials [J]. Materials Engineering,2023,51(3):89-97.
- [25] Fan K, Wang G Z, Xuan F Z, et al. Local fracture resistance behavior of interface regions in a dissimilar metal welded joint [J]. Engineering Fracture Mechanics,2015,136(3):279-291.