

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0370

# 焊接缺陷对异种铝合金 TIG 对接接头 疲劳行为的影响

王池权\*, 石亮, 张祥春, 刘志毅, 邵成伟

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

**摘 要:** 以 5A06-O/7A05-T6 异种铝合金钨极氩弧焊(TIG)对接接头为对象,通过疲劳试验数据和断口形貌分析,研究了气孔缺陷和未熔合缺陷对焊接接头疲劳性能的影响规律及机理。结果表明:气孔缺陷和未熔合缺陷对 5A06-O/7A05-T6 对接接头的疲劳性能均产生不利影响,且缺陷的大小、位置与载荷的交互作用是影响疲劳裂纹提前萌生的主要因素,同一应力水平下,疲劳裂纹更易萌生于尺寸较大且位置更接近于材料表面的焊接缺陷处,而随着应力水平的降低,焊接缺陷对焊接接头疲劳性能的不利影响更为显著;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,且焊接接头组织相较于焊接母材组织更脆,疲劳裂纹以穿晶和沿晶形式交替扩展,使疲劳寿命进一步缩短。

**关键词:** 铝合金; 钨极氩弧焊(TIG); 焊接缺陷; 疲劳; SEM

**中图分类号:** V261.3; TG40

**文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5965(2021)07-1505-10

铝合金材料具有比强度高、耐腐蚀性好等优点,其焊接结构在汽车、高铁和航空航天领域得到了大量应用<sup>[1]</sup>。由于铝合金具有较好的导电导热性,且与氧的亲合力大,在焊接母材和填充焊丝的重熔过程中容易形成气孔、未熔合、裂纹等缺陷<sup>[2-5]</sup>,使焊接接头成为焊接结构的薄弱部位,而铝合金焊接结构在服役过程中又常常受到交变载荷的作用<sup>[6-8]</sup>,为此,针对焊接缺陷对铝合金焊接接头疲劳性能的影响开展了大量研究。张红霞等<sup>[9]</sup>对 5A06 铝合金及其焊接接头疲劳性能断裂行为进行了研究,结果发现,5A06 铝合金对接接头、横向十字接头等焊接接头的疲劳强度均低于 5A06 铝合金母材。何超等<sup>[10]</sup>采用超声疲劳试验方法研究了气孔对铝合金 5052-H32 焊接接头超高周疲劳性能的影响,结果表明,气孔缺陷是诱发

疲劳裂纹萌生的主要原因,相同疲劳寿命下焊接接头疲劳强度较母材下降了 73.3%。赵旭和陈辉<sup>[11]</sup>通过疲劳试验与断口形貌分析研究了 7N01 铝合金平滑焊接接头疲劳裂纹萌生的机理,结果发现,焊接接头疲劳裂纹起源于焊缝中近熔合线的液化微孔或微裂纹处,随循环载荷不断作用,裂纹逐步合并、扩展,直至断裂。宋哲<sup>[12]</sup>和胡志力<sup>[13]</sup>等分别研究了气孔缺陷对 7020 铝合金激光复合焊接接头和 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头疲劳行为的影响,结果发现,疲劳裂纹多萌生于表面和近表面较大气孔处或者近表面簇集的小气孔处,且焊接接头的疲劳性能随着气孔尺寸和外加应力的增大而不断降低。邓彩艳等<sup>[14]</sup>采用超高周疲劳试验系统研究了 7050-T7451 铝合金搅拌摩擦焊接头的超高周疲劳性能,结果表明,裂纹萌

收稿日期: 2020-07-29; 录用日期: 2020-10-23; 网络出版时间: 2020-11-05 14:27

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20201104.1502.005.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20201104.1502.005.html)

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1106300)

\* 通信作者. E-mail: wangchiquan301@163.com

**引用格式:** 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 C Q, SHI L, ZHANG X C, 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 (in Chinese).

生位置取决于表面起裂和内部起裂相互竞争的结果,应力范围较高时,试件的疲劳裂纹往往在表面萌生,随着应力范围的降低,裂纹有亚表面和内部萌生的倾向。吴圣川等<sup>[15]</sup>通过高周疲劳试验研究了气孔缺陷对铝合金 7020-T651 和 7050-T7451 焊接接头疲劳极限的影响,结果发现,铝合金 7020-T651 和 7050-T7451 焊接接头疲劳极限均低于母材,其中 7020-T651 焊接接头疲劳极限约为母材的 63.1%,铝合金 7050-T7451 焊接接头疲劳极限约为母材的 43.5%。

异种金属材料焊接结构可以充分发挥不同材料的性能优势,而在常见的焊接方法中,钨极氩弧焊(TIG)由于具有焊缝金属致密,强度、韧性和塑性良好等优点,常用于异种金属材料之间的焊接<sup>[16-19]</sup>,但异种金属材料的熔点、热导率等物理特性和力学性能均存在较大差异,因此异种金属材料在焊接过程中更容易产生气孔、未熔合等缺陷<sup>[20-22]</sup>。目前,国内外对于异种金属材料特别是异种铝合金焊接接头的疲劳性能研究较少,含缺陷异种铝合金焊接接头疲劳裂纹萌生及扩展的影响机制也尚待进一步认识。为此,本文以 5A06-O/7A05-T6 异种铝合金 TIG 对接接头作为研究对象,试验测定了 5A06-O/7A05-T6 异种铝合金 TIG 对接接头的疲劳性能,通过试验数据对比以及疲劳断口 SEM 分析,研究焊接缺陷对 5A06-O/7A05-T6 异种铝合金 TIG 对接接头(以下简称 5A06-O/

7A05-T6 对接接头)疲劳性能的影响规律及机理,为异种铝合金焊接结构的工程应用提供参考。

## 1 疲劳试验

为了试验研究焊接缺陷对 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳性能的影响,采用 ER5356 焊丝通过 TIG 焊将母材 5A06-O 和 7A05-T6 焊接在一起,再根据焊接接头部位的超声 TOFT 及胶片射线检测结果,确定含气孔缺陷和未熔合缺陷的区域,分别制备了去除焊缝余高的 5A06-O/7A05-T6 平滑焊接接头疲劳测试试样(气孔缺陷、未熔合缺陷)。焊接母材及焊丝的力学性能和化学成分如表 1 和表 2 所示。5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳试样的几何形状与尺寸如图 1 所示,考虑到实际使用情况,对 5A06-O/7A05-T6 对接接头余高进行打磨,再进行表面抛光处理以降低残余应力的影响。

表 1 5A06-O/7A05-T6 焊接母材及焊丝的力学性能  
Table 1 Mechanical properties of 5A06-O/7A05-T6 welding base metal and welding wire

材料	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ /%
5A06-O	356.4	161.8	21.14
7A05-T6	414.4	311.6	13.56
5A06-O/7A05-T6	281.08	157.33	11.43

注: $\sigma_b$  为强度极限, $\sigma_s$  为屈服极限, $\delta$  为延伸率。

表 2 5A06-O/7A05-T6 焊接母材及焊丝的化学成分

Table 2 Chemical composition of 5A06-O/7A05-T6 welding base metal and welding wire

材料	元素含量							
	Mg	Mn	Zn	Fe	Si	Cu	Ti	Al
5A06-O	6.2	0.62	0.23	0.13	0.12	0.11	0.03	Bal.
	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Ti	Al
7A05-T6	4.58	1.37	0.22	0.16	0.15	0.08	0.04	Bal.
	Mg	Fe	Mn	Ti	Si	Zn	Cu	Al
ER5356	4.59	0.13	0.12	0.1	0.04	0.01	0.001	Bal.

注: Bal. 表示 Al 元素的含量为除了表中已经列出的元素含量外剩下的化学元素含量。

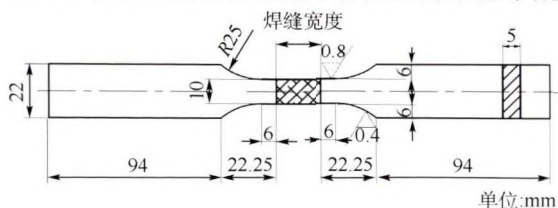


图 1 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳测试试样

Fig. 1 Fatigue test specimen of 5A06-O/7A05-T6 butt joint

参照标准 ASTM E466 - 2015<sup>[23]</sup>,在 MTS-100 kN 液压伺服机上进行 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)的恒载疲劳试验

(见图 2),试验环境及加载方式如表 3 所示,加载波形为正弦波,加载应力比  $R = 0.1$ ,加载频率  $f = 10$  Hz。

5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)在中、短疲劳寿命区的中值疲劳寿命( $p = 50\%$ )采用三级成组试验法测定<sup>[24]</sup>,每级试验的应力水平参照焊接母材的疲劳寿命试验数据进行选择,其中 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷)所选应力水平分别为 200 MPa、160 MPa 和 120 MPa;5A06-O/7A05-T6 对接接头(未熔合缺



图 2 疲劳测试  
Fig. 2 Fatigue test

表 3 试验环境

Table 3 Test environments

环境	温度/℃	试样	加载方式
干燥大气	25 ± 3	5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷)	T-T 恒幅加载
干燥大气	25 ± 3	5A06-O/7A05-T6 对接接头(未熔合缺陷)	T-T 恒幅加载

所选应力水平分别为 120 MPa、90 MPa 和 60 MPa,且每级应力水平下的有效试样数不少于 3 个。

试验后利用 JSM-6010LA 型扫描电子显微镜对焊接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)试样的断口进行观察,分析其破坏机理,并结合图像处理软件对疲劳源处缺陷尺寸进行测量及统计。

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 含缺陷焊接接头与焊接母材疲劳性能对比

通过观察 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)试样的破坏位置,发现 5A06-O/7A05-T6 对接接头的破坏位置均位于靠近母材 7A05-T6 一侧的热影响区,这与同种铝合金焊接接头破坏位置发生在随机一侧热影响区不同<sup>[25-26]</sup>,这是由于 5A06-O/7A05-T6 对接接头采用的 ER5356 焊丝物理性能及化学成分与 7A05-T6 相差较大,易在 7A05-T6 铝合金一端形成气孔、未熔合等缺陷,从而导致疲劳裂纹提前萌生。

5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)和焊接母材<sup>[27]</sup>的疲劳试验数据点如图 3 所示, $N$  为疲劳循环次数, $S_{max}$  为疲劳载荷最大应力水平值。从图中可以看出,5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷)同一组疲劳数据点与焊接母

材疲劳数据点的分散性基本一致,这是由于气孔缺陷的数量一般较多,且其大小及分布具有与材料初始缺陷类似的随机性<sup>[12,15]</sup>,而 5A06-O/7A05-T6 对接接头(未熔合缺陷)同一组疲劳数据点与焊接母材疲劳数据点的分散性相差很大,这是由于 5A06-O/7A05-T6 对接接头(未熔合缺陷)试样中通常只存在一个未熔合缺陷,且不同试样中的未熔合缺陷尺寸相差较大,导致其数据点的分散性增大。

由于疲劳性能曲线本身考虑了材料初始缺陷、表面状态等特性的随机性,可以将气孔缺陷作为材料的一种初始缺陷,采用最小二乘法拟合得到的焊接母材 5A06-O、7A05-T6 和 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷)的中值疲劳  $S-N$  曲线及其表达式分别如图 3 及表 4 所示。从图 3 中可以看出,5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)的疲劳寿命均随着应力水平的增大而缩短,而在同一应力水平下,5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)的疲劳寿命均低于焊接母材 5A06-O 和 7A05-T6 的疲劳寿命,且含未熔合缺陷的 5A06-O/7A05-T6 对接接头的疲劳寿命最低,这说明气孔缺陷和未熔合缺陷对 5A06-O/7A05-T6 对接接头的疲劳性能均产生不利影响,且未熔合缺陷对 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳性能的不利影响最大。

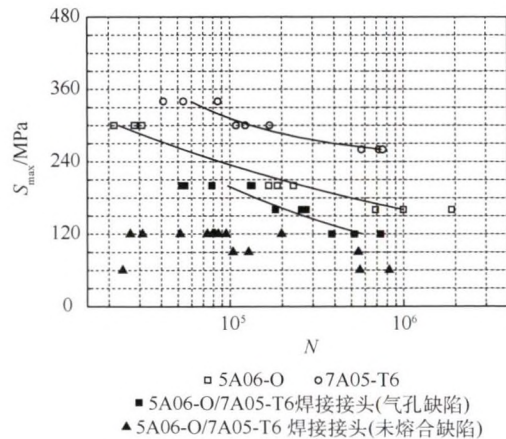


图 3 疲劳测试结果

Fig. 3 Fatigue test results

表 4 疲劳 S-N 曲线

Table 4 Fatigue S-N curves

试样	试验环境	S-N 曲线
5A06-O	干燥大气	$S_{max}^{6.02} N = 1.86 \times 10^{19}$
7A05-T6	干燥大气	$(S_{max} - 240.3)^{1.56} N = 7.8 \times 10^7$
5A06-O/7A05-T6 焊接接头(气孔缺陷)	干燥大气	$S_{max}^{3.50} N = 1.08 \times 10^{13}$

### 2.2 气孔缺陷对 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳性能的影响

气孔缺陷作为焊接过程中难以避免出现的一类缺陷,其大小及位置对焊接接头疲劳裂纹的萌生均会产生影响,因此,首先对 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷)试样疲劳裂纹萌生处的气孔缺陷尺寸及其距试样表面的最小距离进行测量。由于气孔缺陷近似为球形,其尺寸由直径来表征,测量过程如图 4 所示,测量结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,导致疲劳裂纹萌生的气孔缺陷直径大小集中在 85 ~ 140 μm 之间,且气孔缺陷距试样表面的最小距离位于 130 ~ 300 μm 范围内。

为了进一步研究气孔缺陷对 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳性能的影响,定义疲劳寿命为  $N$  时,5A06-O/7A05-T6 对接接头的气孔缺陷影响系数  $K_{\text{pore}}$  为

$$K_{\text{pore}} = \frac{S_{\text{bm}}}{S_{\text{pore}}} \quad (1)$$

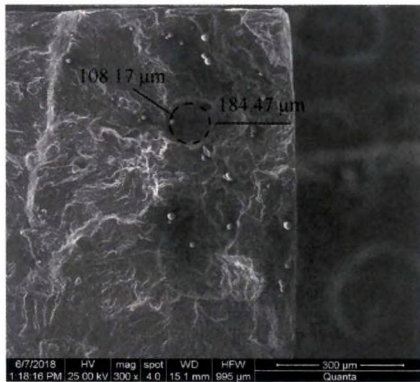


图 4 疲劳裂纹萌生处气孔缺陷尺寸及位置测量  
Fig. 4 Measurement of size and location of pore defects at the position of fatigue crack initiation

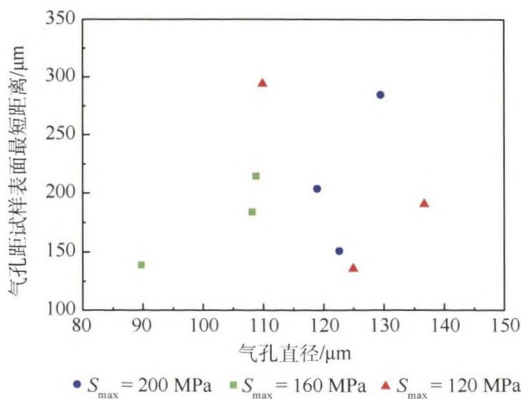


图 5 疲劳裂纹萌生处气孔缺陷尺寸及位置分布  
Fig. 5 Size and location distribution of pore defects at the position of fatigue crack initiation

式中: $S_{\text{bm}}$ 为焊接母材 5A06-O 疲劳寿命为  $N$  时对应的疲劳强度; $S_{\text{pore}}$ 为 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷)疲劳寿命为  $N$  时对应的疲劳强度。

根据拟合得到的焊接母材 5A06-O 和 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷)的疲劳  $S-N$  曲线表达式,可以得到 5A06-O/7A05-T6 对接接头的气孔缺陷影响系数  $K_{\text{pore}}$  曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,5A06-O/7A05-T6 对接接头的气孔缺陷影响系数  $K_{\text{pore}}$  随着疲劳寿命  $N$  的增加(即应力水平的降低)而不断增大且均大于 1,这说明与高应力水平(对应低周疲劳寿命  $N$ )相比,低应力水平(对应高周疲劳寿命  $N$ )下的 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷)的疲劳强度相较于焊接母材 5A06-O 下降更快,即应力水平越低,气孔缺陷对焊接接头疲劳性能的不利影响越大。

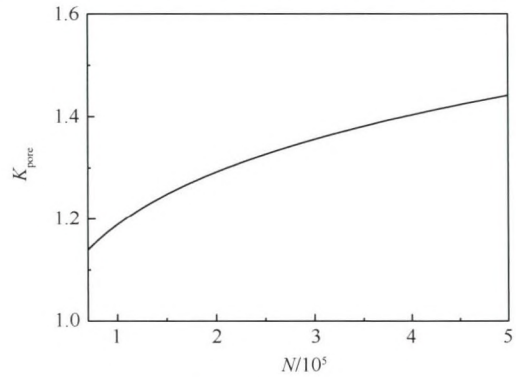


图 6 气孔缺陷影响系数曲线

Fig. 6 Influence coefficient curve of pore defect

### 2.3 未熔合缺陷对 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳性能的影响

在现有焊接质量验收规范中,一般不允许焊缝处出现未熔合缺陷,但受限于结构形式、焊接工艺及经济性等因素影响,5A06-O/7A05-T6 异种铝合金焊接结构在焊接过程中容易在局部位置产生未熔合缺陷,这就需要进一步研究未熔合缺陷对 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳性能的影响,为 5A06-O/7A05-T6 异种铝合金焊接结构剩余寿命的评定提供数据支撑。

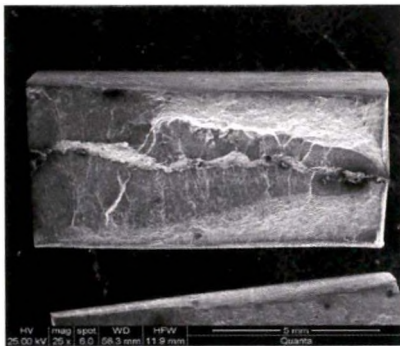
首先利用 Photoshop 图像处理软件提取 5A06-O/7A05-T6 对接接头(未熔合缺陷)断口照片中的未熔合边界,进而计算得到未熔合缺陷面积占断口截面面积的比例值,具体方法如下:首先利用 JSM-6010LA 型扫描电子显微镜对含未熔合缺陷的 5A06-O/7A05-T6 对接接头断口进行拍照(见图 7(a));然后利用 Photoshop 图像处理软件提取未熔合区域的边界,并将未熔合区域内部设定为白色,其他区域设定为黑色(见图 7(b));最

后根据颜色分布直方图中白色区域的百分比、断口以及照片的实际面积,即可计算得到未熔合缺陷面积占断口截面面积的比例值。采用上述方法计算得到的未熔合缺陷面积占断口截面面积的比例值分布如图 8 所示。从图 8 中统计可得,绝大多数未熔合缺陷的比例值小于 30%,占试样总数的 84.2%。

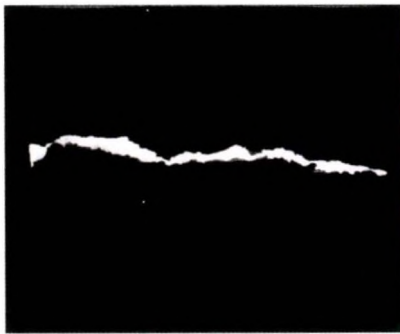
定义疲劳寿命为  $N$  时,5A06-O/7A05-T6 对接接头的未熔合缺陷影响系数  $K_{if}$  为

$$K_{if} = \frac{S_{bm}}{S_{if}} \quad (2)$$

式中:  $S_{if}$  为 5A06-O/7A05-T6 对接接头(未熔合缺陷)疲劳寿命为  $N$  时对应的疲劳强度。



(a) 未熔合缺陷断口照片



(b) 未熔合缺陷图像处理效果图

图 7 未熔合缺陷图像处理过程

Fig. 7 Image processing procedure of incomplete fusion defect

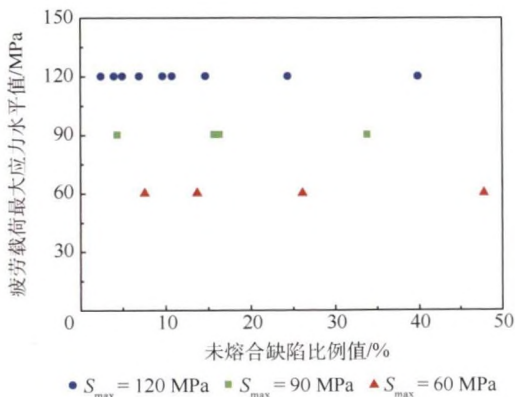


图 8 未熔合缺陷比例值分布

Fig. 8 Proportion distribution of incomplete fusion defects

根据拟合得到的焊接母材 5A06-O 的疲劳  $S-N$  曲线表达式和含未熔合缺陷 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳数据,可得到不同应力水平下的未熔合缺陷影响系数  $K_{if}$ ,如图 9 所示。从图 9 中可以看出,不同应力水平下的焊接接头未熔合缺陷影响系数均大于 1,且同一应力水平下的未熔合缺陷影响系数随着未熔合缺陷比例的增加而不断增大,说明未熔合缺陷比例越大,5A06-O/7A05-T6 对接接头(未熔合缺陷)的疲劳性能相较于焊接母材的疲劳性能下降越快。

在图 9 数据点的基础上,采用最小二乘法进一步拟合得到不同应力水平下的未熔合缺陷影响系数  $K_{if}$  曲线如图 9 和表 5 所示。从图 9 中可以看出,同一应力水平下,未熔合缺陷影响系数与未熔合缺陷比例值近似呈线性关系,且不同应力水平下的未熔合缺陷影响系数  $K_{if}$  曲线近似平行。此外,应力水平低的未熔合缺陷影响系数曲线均位于应力水平高的未熔合缺陷影响系数曲线上方,说明未熔合缺陷比例相同的情况下,缺陷处引起的应力集中随着应力水平的增加而均匀增大,并且与高应力水平(对应低周疲劳寿命  $N$ )相比,低应力水平(对应高周疲劳寿命  $N$ )下的 5A06-O/7A05-T6 对接接头(未熔合缺陷)的疲劳强度相较于焊接母材下降更快,即应力水平越低,未熔合缺陷对焊接接头疲劳性能的不利影响越大。

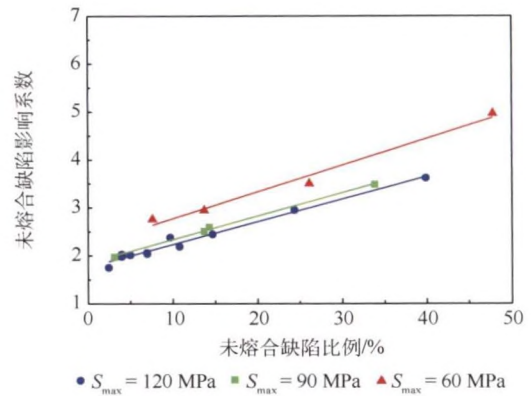


图 9 未熔合缺陷影响系数曲线

Fig. 9 Influence coefficient curves of incomplete fusion defect

表 5 未熔合缺陷影响系数拟合曲线

Table 5 Fitting curves of influence coefficient of incomplete fusion defect

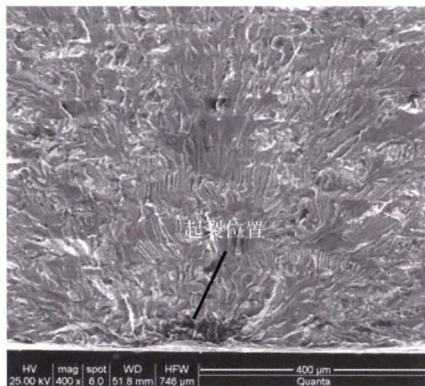
$S_{max}/\text{MPa}$	未熔合缺陷影响系数曲线	相关系数 $R^2$
120	$y = 0.047x + 1.75$	0.979
90	$y = 0.049x + 1.84$	0.997
60	$y = 0.056x + 2.21$	0.983

### 2.4 焊接缺陷对 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳裂纹萌生及扩展的影响

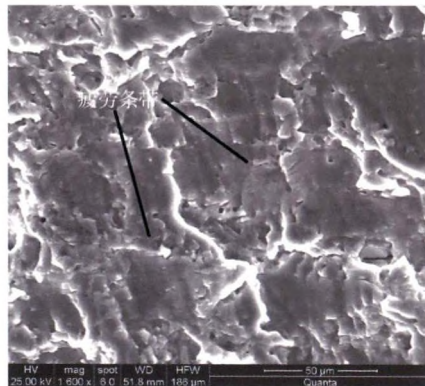
为了进一步探究焊接缺陷的大小、位置等对 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳裂纹萌生及扩展的影响机理,利用 JSM-6010LA 型扫描电子显微镜对铝合金 5A06-O 和 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)中的典型疲劳断口进行观测,如图 10 ~ 图 12 所示。图 10 中,  $S_{max} = 160 \text{ MPa}$ ,  $N = 6.87 \times 10^5$ ;图 11 中,  $S_{max} = 120 \text{ MPa}$ ,  $N = 5.20 \times 10^5$ 。

对比铝合金 5A06-O 和 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)的疲劳源区,可以看出,铝合金 5A06-O 和 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷)断口处的疲劳裂纹均在试样表

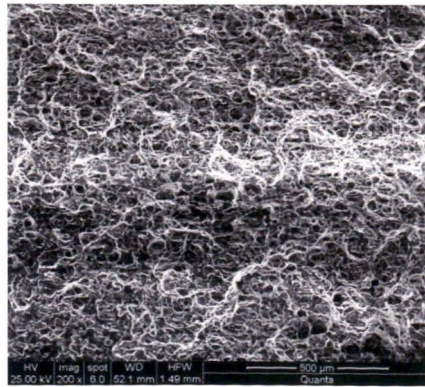
面或近表面初始缺陷处萌生并以点源形式逐渐扩展(见图 10(a)和图 11(a))。其中铝合金 5A06-O 起裂位置处存在塑性滑移特征,说明铝合金材料中的第二相粒子或夹杂等缺陷在位错滑移过程中引起的塑性变形是导致疲劳裂纹萌生的主要原因;而 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷)起裂位置处存在明显的气孔缺陷(见图 11(a)),说明近表面气孔缺陷引起的应力集中是导致疲劳裂纹萌生的主要原因<sup>[11-13]</sup>。对于 5A06-O/7A05-T6 对接接头(未熔合缺陷),根据未熔合缺陷的大小及分布,断口处的疲劳源区除了主疲劳源外还存在次疲劳源(见图 12(a)),且疲劳裂纹均在试样内部未熔合缺陷边缘处萌生,并以多个临近点源



(a) 疲劳源区



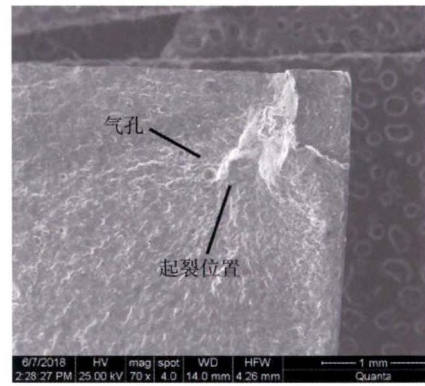
(b) 裂纹扩展区



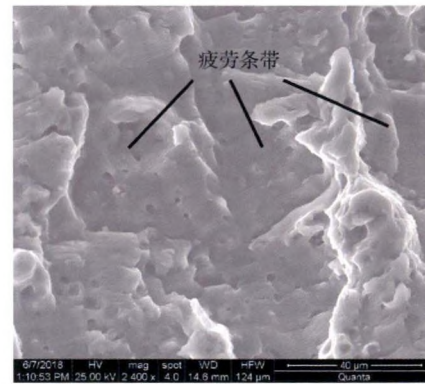
(c) 瞬断区

图 10 铝合金 5A06-O 疲劳断口

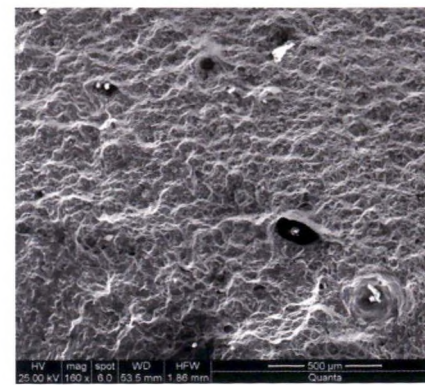
Fig. 10 Fatigue fracture of 5A06-O aluminum alloy



(a) 疲劳源区



(b) 裂纹扩展区



(c) 瞬断区

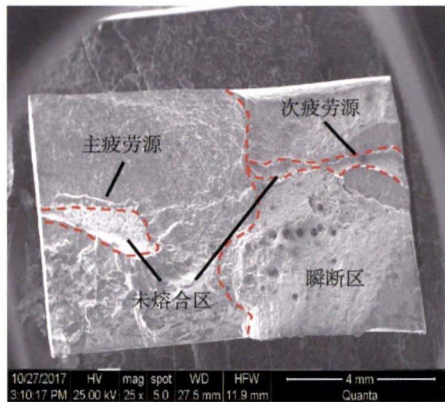
图 11 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳断口(气孔缺陷)

Fig. 11 Fatigue fracture of 5A06-O/7A05-T6 butt joint (pore defect)

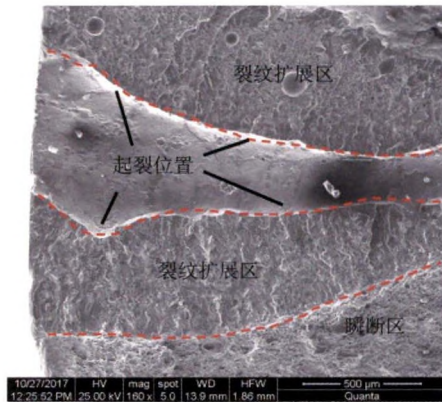
形成的线源形式逐渐扩展,不同点源处的裂纹不断扩展直至交汇形成台阶特征(见图 12 (b)和 (d)),此外,疲劳源区还可见焊接过程中形成的气孔缺陷,这说明与气孔缺陷相比,未熔合缺陷边缘处的应力集中效应更加明显,更容易导致疲劳裂纹萌生。

对比铝合金 5A06-O 和 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)的疲劳裂纹扩展区,可以看出,铝合金 5A06-O 和 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)的疲劳裂纹扩展区均可见致密、连续的疲劳条带,其中 5A06-O

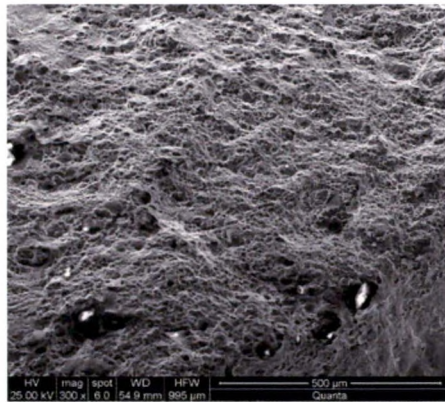
疲劳条带附近可见由二次相颗粒脱落形成的韧窝特征(见图 10 (b)),而 5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)的疲劳条带附近还存在大量夹杂脱落和气孔形成的孔洞特征(见图 11(b)、图 12 (e)和图 12 (f))。与铝合金 5A06-O 的裂纹扩展区相比,5A06-O/7A05-T6 对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)裂纹扩展区中的疲劳条带较不明显,且存在脆性开裂特征(见图 10(b)和图 12(e)),说明 5A06-O/7A05-T6 对接接头相较于铝合金 5A06-O 更脆,从而在裂纹扩展的过程中容易形成短促、不连续的二次裂纹。



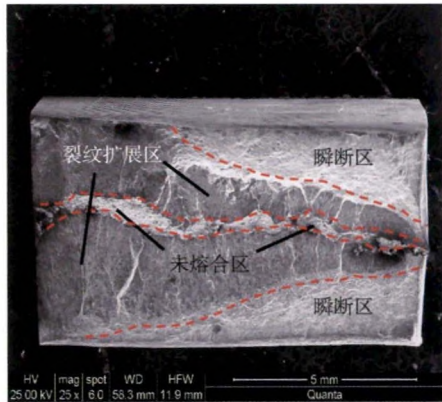
(a) 疲劳源区,  $S_{max} = 120 \text{ MPa}$ ,  $N = 8.57 \times 10^4$



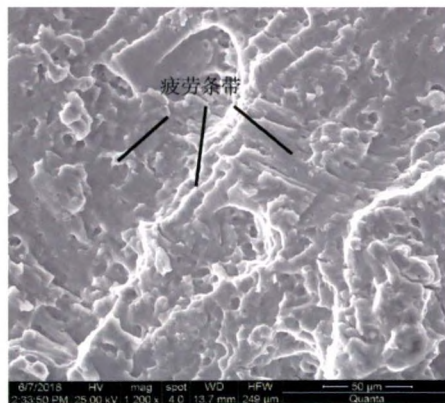
(b) 裂纹萌生处,  $S_{max} = 120 \text{ MPa}$ ,  $N = 8.57 \times 10^4$



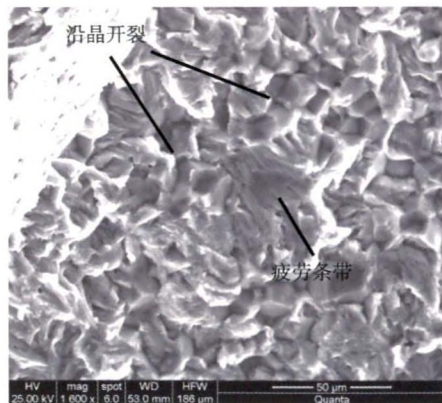
(c) 瞬断区,  $S_{max} = 120 \text{ MPa}$ ,  $N = 8.57 \times 10^4$



(d) 疲劳源区,  $S_{max} = 120 \text{ MPa}$ ,  $N = 7.94 \times 10^4$



(e) 裂纹稳定扩展区,  $S_{max} = 120 \text{ MPa}$ ,  $N = 7.94 \times 10^4$



(f) 裂纹快速扩展区,  $S_{max} = 120 \text{ MPa}$ ,  $N = 7.94 \times 10^4$

图 12 5A06-O/7A05-T6 对接接头疲劳断口(未熔合缺陷)

Fig. 12 Fatigue fracture of 5A06-O/7A05-T6 butt joint (incomplete fusion defect)

此外,在裂纹快速扩展区中的疲劳条带附近还存在大量沿晶开裂特征(见图12(f)),说明焊接接头的疲劳裂纹在扩展中后期是以穿晶和沿晶形式交替扩展。对比铝合金5A06-O和5A06-O/7A05-T6对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)瞬断区形貌,可以发现5A06-O/7A05-T6对接接头瞬断区的韧窝大小不一,同时存在大量大小不一的气孔、夹杂等焊接缺陷,且随机分布于整个断口截面处。

### 3 结 论

试验测定了5A06-O/7A05-T6异种铝合金TIG对接接头(气孔缺陷、未熔合缺陷)在干燥大气环境下的疲劳性能,并对试样断口进行SEM分析,研究了焊接缺陷与载荷联合作用对5A06-O/7A05-T6异种铝合金TIG对接接头疲劳性能的影响机理,得到以下结论:

1) 5A06-O/7A05-T6异种铝合金TIG对接接头更易在7A05-T6一侧的热影响区处产生气孔、未熔合等缺陷,导致疲劳裂纹萌生,且气孔缺陷和未熔合缺陷影响系数均大于1,说明气孔缺陷和未熔合缺陷对5A06-O/7A05-T6对接接头的疲劳性能均产生不利影响,并且应力水平越低,焊接缺陷与疲劳载荷的交互作用越充分,疲劳性能下降越明显。

2) 与含气孔缺陷的5A06-O/7A05-T6对接接头相比,含未熔合缺陷的5A06-O/7A05-T6对接接头的疲劳性能下降更为显著,且未熔合缺陷比例越大,焊接接头的疲劳性能下降越快。

3) 缺陷的大小、位置与载荷的交互作用是影响疲劳裂纹提前萌生的主要因素,同一应力水平下,疲劳裂纹更易萌生于尺寸较大且位置更接近材料表面的缺陷处,相较于气孔缺陷未熔合边缘更容易引起应力集中,导致疲劳裂纹从材料内部提前萌生,并以穿晶和沿晶形式交替扩展,使疲劳寿命进一步缩短。

#### 参考文献 (References)

- [1] 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(S2):1037-1041.  
MA Q N, SHAO F, GAO L. Overview of research progress of fatigue of aluminum alloy butt joints[J]. Building Structure, 2018,48(S2):1037-1041 (in Chinese).
- [2] 李占明,朱有利,杜晓坤,等. 铝合金手工GTAW焊接缺陷及其对疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺,2012,41(15):133-135.  
LI Z M, ZHU Y L, DU X K, et al. Effect of aluminum alloy welding defects in gas tungsten arc welding on fatigue properties [J]. Hot Working Technology, 2012,41(15):133-135 (in Chinese).
- [3] 马思群,谷理想,袁水文,等. 焊接缺陷对动车组铝合金车体疲劳寿命影响研究[J]. 铁道学报,2014,36(2):42-48.  
MA S Q, GU L X, YUAN Y W, et al. Research on influence of welding defects on fatigue life of EMU aluminum-alloy car body [J]. Journal of the China Railway Society, 2014,36(2):42-48 (in Chinese).
- [4] ZHU C X, TANG X H, HE Y, et al. Effect of preheating on the defects and microstructure in NG-GMA welding of 5083 Al-alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018,251:214-224.
- [5] 邹东利,陈向林,肖大武,等. 5A06铝合金激光焊接接头显微组织及缺陷分析[J]. 稀有金属材料与工程,2019,48(9):2951-2956.  
ZOU D L, CHEN X L, XIAO D W, et al. Microstructure and defects analysis of 5A06 aluminium alloy laser butt joint[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019,48(9):2951-2956 (in Chinese).
- [6] 王池权,熊峻江,马少俊,等. 航空铝合金材料腐蚀裂纹扩展性能试验[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(5):935-941.  
WANG C Q, XIONG J J, MA S J, et al. Tests for corrosion crack propagation behavior of aeronautical aluminum alloys[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017,43(5):935-941 (in Chinese).
- [7] ZHANG B, CHEN W, POIRIER D R. Effect of solidification cooling rate on the fatigue life of A356.2-T6 cast aluminum alloy[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2000,23(5):417-423.
- [8] 王晨,王贝贝,薛鹏,等. SiCp/6092Al复合材料搅拌摩擦焊接头的疲劳行为研究[J]. 金属学报,2019,55(1):149-159.  
WANG C, WANG B B, XUE P, et al. Fatigue behavior of friction stir welded SiCp/6092Al composite[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019,55(1):149-159 (in Chinese).
- [9] 张红霞,吴广贺,闫志峰,等. 5A06铝合金及其焊接接头的疲劳断裂行为[J]. 中国有色金属学报,2013(2):327-335.  
ZHANG H X, WU G H, YAN Z F, et al. Fatigue fracture behavior of 5A06 aluminum alloy and its butt joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013(2):327-335 (in Chinese).
- [10] 何超,崔仕明,刘永杰,等. 气孔对铝合金焊接接头超长疲劳寿命的影响[J]. 焊接学报,2014(11):18-22.  
HE C, CUI S M, LIU Y J, et al. Arc behavior of A-MIG welding and microstructure of aluminum alloy butt joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014(11):18-22 (in Chinese).
- [11] 赵旭,陈辉. 7N01铝合金平滑焊接接头疲劳性能研究[J]. 热加工工艺,2016,45(21):183-186.  
ZHAO X, CHEN H. Research on fatigue property of smooth weld joints in 7N01 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2016,45(21):183-186 (in Chinese).
- [12] 宋哲,吴圣川,胡雅楠,等. 冶金型气孔对熔化焊接7020铝

- 合金疲劳行为的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(8): 1131-1140.
- SONG Z, WU S C, HU Y N, et al. The influence of metallurgical pores on fatigue behaviors of fusion welded AA7020 joints[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(8): 1131-1140 (in Chinese).
- [13] 胡志力, 李锦, 万心勇, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接头服役孔洞裂纹扩展规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(3): 892-897.
- HU Z L, LI J, WAN X Y, et al. Crack propagation law of holes in aluminum alloy friction stir welding joint[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(3): 892-897 (in Chinese).
- [14] 邓彩艳, 高仁, 龚宝明, 等. 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头超高周疲劳性能[J]. 焊接学报, 2018, 39(11): 114-118.
- DENG C Y, GAO R, GONG B M, et al. Research on ultra-high-cycle fatigue properties of 7050 aluminum alloy FSW butt joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(11): 114-118 (in Chinese).
- [15] 吴圣川, 谢成, 胡雅楠, 等. 中高强度铝合金熔化焊接接头的缺陷容忍评价方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 46-59.
- WU S C, XIE C, HU Y N, et al. Defect tolerance assessment method of fusion welded medium and high strength Al alloy joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 46-59 (in Chinese).
- [16] 孔令明, 杜双明, 韩赉, 等. 镁合金/不锈钢钨极氩弧熔钎焊接头结合界面微观组织分析[J]. 矿冶工程, 2017, 37(5): 118-121.
- KONG L M, DU S M, HAN Y, et al. Analysis of interface microstructure of TIG brazing joint of magnesium alloy and stainless steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(5): 118-121 (in Chinese).
- [17] LIU F, LIU Y, WU Y. Effect of lattice matching degree and intermetallic compound on the properties of Mg/Al dissimilar material butt joints[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 22(8): 719-725.
- [18] DU H G, LI Y J, XU X Y, et al. Analysis of microstructure and properties of Mg/Al dissimilar joints by GTAW with Al-Si filler wire[J]. Kovove Mater, 2015, 53: 113-118.
- [19] 饶文姬, 魏守征, 李志勇, 等. AZ31B/5A06 脉冲熔化极氩弧焊焊缝组织特性[J]. 热加工工艺, 2019, 48(21): 26-30.
- RAO W J, WEI S Z, LI Z Y, et al. Microstructures of weld seam during pulsed metal inert-gas welding of AZ31B and 5A06 dissimilar alloys[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(21): 26-30 (in Chinese).
- [20] 杜红燕, 李亚江. AZ31/7005 异种材料填丝 GTAW 焊接接头的组织与性能[J]. 材料工程, 2014(9): 14-19.
- DU H Y, LI Y J. Microstructures and properties of AZ31/7005 dissimilar joints by GTAW with filler wire[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(9): 14-19 (in Chinese).
- [21] 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(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(1): 43-48 (in Chinese).
- [22] 吕堂祺, 丁凯, 施睿贇, 等. 20 钢-铝青铜焊接接头的组织和高周次疲劳性能研究[J]. 上海金属, 2020, 42(1): 13-16.
- LV T Q, DING K, SHI R Y, et al. Investigation on microstructure and high-cycle fatigue behavior of butt joint of 20 steel and albronzes[J]. Shanghai Metals, 2020, 42(1): 13-16 (in Chinese).
- [23] Standard Practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of materials: ASTM E466 - 2015[S]. America Society for Testing and Materials International, 2015.
- [24] 高镇同, 蒋新桐, 熊峻江, 等. 疲劳性能试验设计和数据处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999: 21-23.
- GAO Z T, JIANG X T, XIONG J J, et al. Fatigue experiment design and data processing [M]. Beijing: Beihang University Press, 1999: 21-23 (in Chinese).
- [25] 李宏伟, 姚为, 王志敏, 等. 激光焊接 ZL114A/5A06 异种铝合金接头组织及性能[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(6): 70-73.
- LI H W, YAO W, WANG Z M, et al. Microstructure and properties of dissimilar aluminum alloys ZL114A/5A06 joints by laser welding[J]. Aerospace Materials & Technology, 2010, 40(6): 70-73 (in Chinese).
- [26] 佟建华, 张坤, 林松, 等. 搅拌摩擦焊和熔化极气体保护焊 6082 铝合金疲劳性能分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 105-108.
- TONG J H, ZHANG K, LIN S, et al. Comparison of fatigue property of 6082 aluminum alloy joint by friction stir welding and metal inert-gas welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 105-108 (in Chinese).
- [27] WANG W K, CAO Z Q, SHI L, et al. Fatigue behavior investigation on dissimilar aluminum alloy ring butt joints in a new type sandwich high-pressure shell[J]. Materials Research Express, 2019, 6(6): 066534.

## Influence of welding defects on fatigue behavior of dissimilar aluminum alloy TIG butt joint

WANG Chiquan<sup>\*</sup>, SHI Liang, ZHANG Xiangchun, LIU Zhiyi, SHAO Chengwei

(China Aero Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Fatigue tests and fracture morphology analyses were performed to determine the influence law and mechanism of pore defect and incomplete fusion defect on the fatigue performance of 5A06-O/7A05-T6 dissimilar aluminum alloy TIG butt joint. The results show that both pore defect and incomplete fusion defect have adverse effects on the fatigue properties of 5A06-O/7A05-T6 butt joint, and the interaction between the size and location of defects and the load is the main factor affecting the early initiation of fatigue cracks. Fatigue cracks are more likely to initiate at the welding defects with larger size and closer to the material surface under the same stress level, and the interaction between welding defects and fatigue loading increases with the decrease of stress level, and ultimately decreases the fatigue strength. Compared with pore defect, the effect of stress concentration at the edge of incomplete fusion defect is more significant, which is more likely to cause fatigue crack initiation, the microstructure of welded joint is more brittle than that of welding base metal, and the fatigue crack propagates alternately in the transgranular and intergranular form, which further shortens the fatigue life.

**Keywords:** aluminum alloy; TIG; welding defects; fatigue; SEM

**Received:** 2020-07-29; **Accepted:** 2020-10-23; **Published online:** 2020-11-05 14:27

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20201104.1502.005.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20201104.1502.005.html)

**Foundation item:** National Key R & D Program of China (2018YFB1106300)

**\* Corresponding author.** E-mail: wangchiquan301@163.com