DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.05.004

基于 X 射线的氩弧焊接头缺陷成像及疲劳强度分析

吕浩,刘小刚

(中航通飞华南飞机工业有限公司,广东 珠海 519040)

摘　要:为研究焊接缺陷对接头疲劳性能的影响,以 1Cr11Ni2W2MoV 氩弧焊接头为例,通过 X 射线计算机断层扫描对焊接接头的缺陷进行检测并开展三维重构,分析焊接缺陷的形貌、尺寸变化规律。结果表明:焊接缺陷主要集中在焊缝内部,部分大尺寸缺陷靠近焊缝表面,同时在焊缝各典型区域中,焊接热影响区的缺陷分布较为集中。结合数据分析的结果,借助极值统计方法得到了焊缝缺陷尺寸的极大值,并以 K-T 图建立焊缝缺陷疲劳强度关系,为焊接接头的疲劳性能评估提供相应参考。

关键词:航空发动机;焊接接头;X 射线计算机断层扫描;焊接缺陷;疲劳强度

中图分类号:TG441.7　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5276(2026)05-0027-06

X-ray-Based Defect Imaging and Fatigue Strength Analysis of Argon Arc Welded Joints

Lyu Hao, Liu Xiaogang

(AVIC GA Huanan Aircraft Industry Co., Ltd., Zhuhai 519040, China)

Abstract: To explore the effect of welding defects on the fatigue performance of the joint, taking the 1Cr11Ni2W2MoV argon arc welded joint as an example, X-ray computed tomography was used to detect defects in the welded joint and perform three-dimensional reconstruction. The morphology and size variation patterns of the welding defects were analyzed. The results show that welding defects are mainly concentrated inside the weld, with some large-sized defects located near the surface. Meanwhile, among the typical regions of the weld, the heat-affected zone exhibits a relatively concentrated distribution of defects. Combined with the data analysis results, the extreme value statistics method was employed to obtain the maximum defect size in the weld, and a K-T diagram was used to establish the relationship between weld defects and fatigue strength, providing a reference for the fatigue performance evaluation of welded joints.

Keywords: aero-engine; welded joint; X-ray computed tomography; welding defect; fatigue strength

0　引言

焊接是一种常用的连接形式,其工艺简单,生产效率高,其在提高材料利用率、降低制造成本等方面具有独特优势,因而被广泛应用于各行业领域的结构连接上[1]。目前常见的焊接方式主要有氩弧焊、电子束焊和激光焊等。接头是焊接结构的重要组成部分,但大多数情况下焊缝区都是焊接结构的薄弱环节。由于焊接接头的疲劳失效而对结构的安全性造成威胁的情况屡有发生,因此焊接接头的疲劳强度及可靠性的问题一直受到各领域研究人员的广泛关注。造成这种情况的主要原因是焊接过程容易产生各种焊接缺陷,缺陷的存在导致焊接接头的承载能力下降,使其更容易发生失效[2-4]。疲劳强度是衡量焊接接头疲劳性能的重要指标,因此研究人员试图从缺陷角度建立焊接缺陷与疲劳强度的关系,为焊接接头的抗疲劳设计提供参考[5-8]。

对焊接接头的缺陷进行表征,研究缺陷的分布规律是评估含有缺陷焊接接头疲劳性能的重要前提。X 射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography, X-CT)是一种先进的三维无损检测技术,能够对结构内部的缺陷进行检测并在检测数据的基础上进行缺陷重构,目前已较多应用于复杂结构的缺陷检测。对焊接接头而言,在加工过程中受材料属性和焊接热效应的影响,容易产生夹杂和孔洞这类冶金缺陷,同时这类缺陷多位于内部或近表面,常规检测手段难以观测,因此 X-CT是一种相对可行的检测方法[9-10]。相较于传统的缺陷检测方式,如磁粉检测、超声检测和涡流检测等,X-CT 能达到的精度和分辨率更高,能详细给出缺陷的尺寸分布及形貌特征,为含缺陷

第一作者简介:吕浩(1998—),男,四川广安人,硕士研究生,研究方向为结构疲劳与断裂,lvlhao@ nuaa.edu.cn。

结构的疲劳性能研究提供完善的数据支撑[11-12]。在研究缺陷尺寸与疲劳强度的关系上,Murakami教授提出以缺陷面积$\sqrt{S_{area}}$来表征缺陷的尺寸,建立基于缺陷尺寸的疲劳强度评估模型[13-14]。Carb和Wu等[15-16]通过将断裂力学方法和传统的名义应力方法相结合,建立K-T图以描述缺陷尺寸与疲劳强度的关系,能够反映疲劳强度随缺陷尺寸的变化规律,并给出允许的临界缺陷尺寸,是一种常见的缺陷评估方式。

本文以航空发动机机匣常用的1Cr11Ni2W2MoV氩弧焊接头为研究对象,采用X-CT对焊接接头的缺陷进行检测,并通过三维重构技术研究缺陷尺寸及分布规律。在此基础上,通过K-T图建立焊接接头的缺陷尺寸与疲劳强度的关系,为焊接接头的缺陷评估提供相应的解决思路。

1　焊接试件加工及缺陷检测

1.1　试件加工

本文焊接加工采用氩弧焊(TIG),焊接母材为1Cr11 Ni2W2MoV马氏体耐热不锈钢,参照HB/Z 5134—2000《结构钢和不锈钢焊接工艺》执行,焊板尺寸如图1所示。钨极氩弧焊(TIG)是一种传统的熔化焊焊接方法,以惰性气体氩气作为保护气体,焊接可靠性较好,但是单道焊接的熔深较低,且由于焊接热输入能量密度偏低,弧柱较宽,容易产生气孔和变形缺陷。因此本文以氩弧焊为研究对象,对其它材料与焊接工艺具有一定的参考价值。

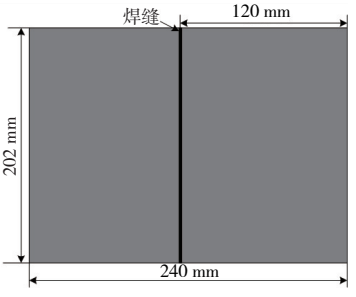
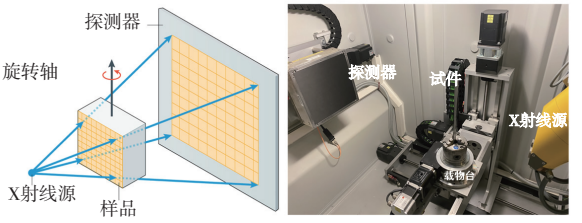


图1　焊板示意图

1.2　X射线缺陷检测

测试系统为某公司的Phoenix V Tome XS多功能X射线微聚焦CT系统,系统采用微纳米双管配置,能够进行二维的X射线检测和三维的计算机断层扫描,是一个多功能的高分辨率系统。X-CT测试的相关参数及测试分辨率如下:扫描电压150 kV,电流150 μA,扫描测试分辨率为8 μm。X-CT测试的主要工作原理是利用不同材质对X射线穿透比的差异,射线透过试样后会在探测器上留下不同的像素点,具体的测试系统及原理如图2所示。本次测试实际的检测区域为焊接试件包含焊缝的一个立方体区域,如图3所示。



(a)测试原理　　(b)测试设备

图2　X-CT测试原理及设备

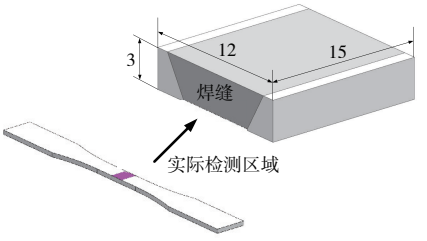


图3　试件实际检测区域

2　缺陷三维成像结果分析

2.1　缺陷三维重构

在测试结束后,通过测试系统配套软件导出测试区域的原始数据,原始数据为高精度的图像数据,需要借助相应的分析软件进行后处理。本文利用Avizo软件对焊缝的缺陷特征展开分析,首先基于测试数据对缺陷进行三维重构,完成缺陷重构,再利用软件的数据分析功能进一步对焊接接头内部缺陷的尺寸、位置分布、数量、形貌等特征开展定量分析。数据分析流程:将原始扫描数据转换为二维的切片灰度图像导入数据分析软件,通过阈值分割、区域增长、选择裁剪、三维模型计算、统计分析等一系列操作,对缺陷进行三维重构建模和数据分析。缺陷三维重构的结果如图4所示。

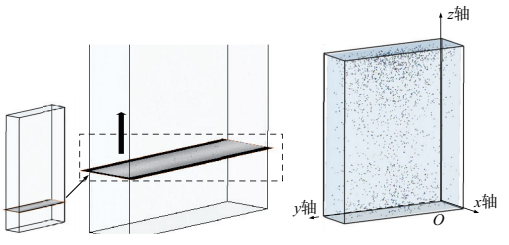


图4　测试区域缺陷的三维重构

2.2　缺陷尺寸及形状参数

目前关于缺陷对疲劳性能影响的研究,大多集中在缺陷的尺寸、位置和形貌等参数上,利用有关参数建立缺陷和疲劳性能的关系,其中缺陷尺寸是表征缺陷的典型特征。九州大学的Murakami教授提出以缺陷在垂直加载方向的投影面积$\sqrt{S_{area}}$来表征缺陷的尺寸,通过缺陷尺寸和材料硬度等参数建立基于缺陷尺寸的疲劳强度评估模型[17]。但对于形貌复杂的缺陷,通过$\sqrt{S_{area}}$的计算结果比较偏于保守。此外等效直径D_{eq}、Feret直径等也是常用的描述缺陷尺寸的参数,实际意义上的Feret直径为并非真实直径,通过粒子轮廓的两个切线之间的距离来定义,被定义为粒子轮廓的两个平行切线以任意角度之间的距离,且一般采用最大Feret直径(类似缺陷的外接圆直径),作为缺陷的尺寸参数。Avizo中的尺寸参数$Breadth_{3D}$的定义与Feret直径相类似,定义以某方向向量为法向量的平面中的最大Feret直径,记为φ_{3D},本文以长度方向为准。缺陷的三维形貌描述采用缺陷的球形度S_{3d}来表征,其定义与圆整度相类似,形状越规则的缺陷,其数值越接近于1,该值越大,表明缺陷的三维形貌越复杂。

$$S_{3d}=\frac{A_S^3}{36\times\pi\times V_{3D}^2} \tag{1}$$

式中:V_{3D}的值等于对应的单位体素的体积乘以对应体素的数量,为缺陷体积;A_S为缺陷轮廓表面积。

如图5所示为本文所测试焊缝区域的缺陷形状参数的分布规律,从中可以看到缺陷的球形度分布区间位于1到5之间,集中分布位于1到2之间,此部分的缺陷球形度的占比超过了70%,表明焊接接头内部缺陷的形貌大部分较为规则,呈现球形或椭球形。

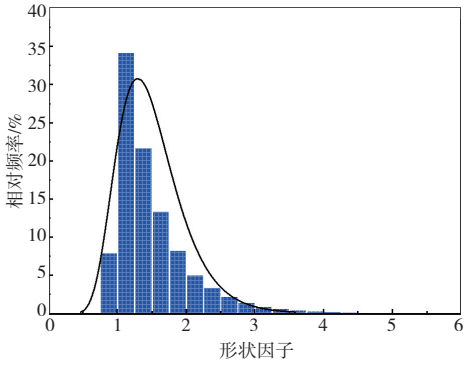


图5　缺陷形状因子分布

图6为从焊缝缺陷三维重构结果中提取的单个缺陷的形貌和与之对应的形状参数。可以看出,球形度越小,缺陷越接近于椭圆或圆形;而形貌越复杂、变形程度越大的缺陷,其球形度越大。因此,对于大尺寸的缺陷在采用等效直径作为缺陷的尺寸参数来表达缺陷尺寸时结果可能偏保守。为进一步了解缺陷尺寸参数与形貌的关系,绘制了试件的缺陷形状参数与尺寸参数的分布关系散点图,如图7所示。分别以缺陷等效直径D_{eq}和尺寸参数φ_{3D}表征缺陷的尺寸,从图7中可以发现,随着缺陷形貌的复杂化,即球形度的逐渐增加,D_{eq}与φ_{3D}的差距越来越大,当缺陷的球形度大于2时,两尺寸参数的差距愈发明显,球形度大于5时,φ_{3D}的大小约为等效直径的两倍,因此后续描述焊接接头缺陷尺寸,可优先考虑以φ_{3D}作为参考。

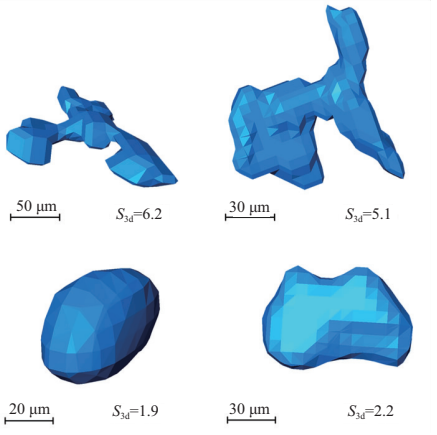


图6　缺陷尺寸和形状因子

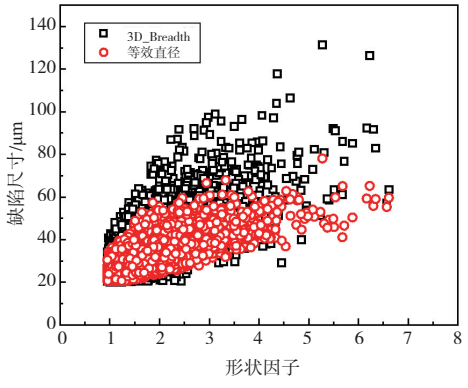


图7　缺陷尺寸和形状因子分布

2.3　缺陷尺寸的分布规律

确定描述缺陷尺寸特征参数后,对焊接接头缺陷尺寸参数的分布情况进行统计分析,结果如

图8所示。从图8中可以发现,缺陷尺寸的分布规律符合对数正态分布,拟合相关系数较高。从图中能够看到,缺陷尺寸集中分布于20~40 μm附近,此部分缺陷占比超过80%,因数量统计上看,小尺寸缺陷占据主要地位,在缺陷尺寸的整体分布上呈现尖峰厚尾的分布特征,试件缺陷尺寸的具体分布与对数正态分布函数如下所示

$$y=y_0+\frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma x}\exp\left[\frac{-(\ln x-\ln\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

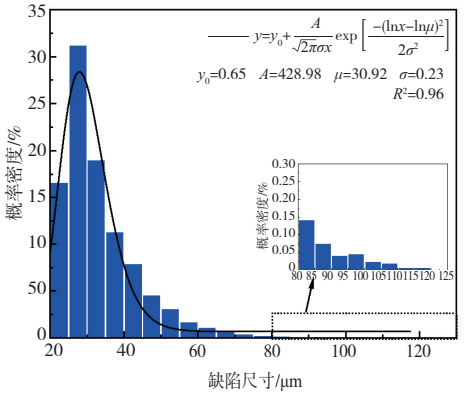


图8　焊接接头缺陷尺寸分布规律

除缺陷尺寸外,缺陷位置对疲劳性能也会产生重要影响,描述缺陷空间位置分布时,常采用相对距离表征缺陷与自由表面的相对位置关系。利用缺陷几何中心到自由表面的距离与试件厚度的比值来表示,比值越低表明缺陷越靠近表面。图9为测试区域示意图,焊缝区包括熔合区(FZ)、热影响区(HAZ)和母材区(BM)。图10为缺陷沿试件厚度(x轴)方向的分布规律,横坐标为相对距离,定义为缺陷中心到yz平面的距离与试件厚度的比值,分析中主要对较大尺寸缺陷(φ_{3D}>60 μm)的分布情况进行统计。结合图10可以发现,缺陷主要集中分布在试件内部,部分大尺寸缺陷位于试件近表面。

为统计缺陷在焊接接头各典型区域的分布特征,定义相对距离为缺陷中心到xy平面距离与测试区域长度的比值,并参考测试区域对焊缝各区进行划分。图11为焊缝各区域的缺陷尺寸分布,从图11可知,缺陷主要集中在两端的热影响区附近,焊缝中心的熔合区缺陷相对较少,同时可以看出,在大尺寸缺陷(φ_{3D}>100 μm)更主要集中分布于两端的热影响区。

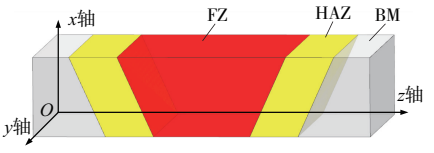


图9　测试区域示意图

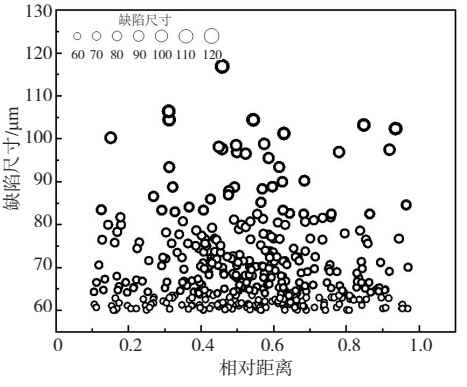


图10　沿厚度方向的缺陷尺寸分布

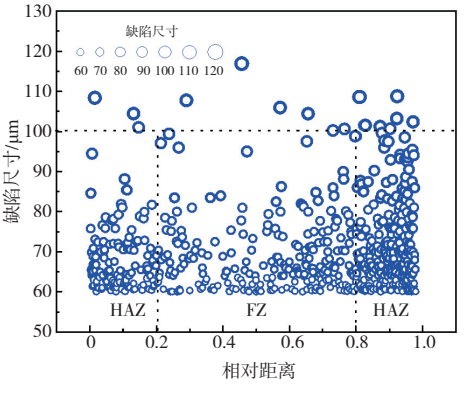


图11　焊缝各区域缺陷尺寸分布

从缺陷的整体和焊接接头各区域的分布规律上能够看出,焊接接头的内部主要以小尺寸缺陷为主,具体尺寸φ_{3D}大约为30 μm。随着缺陷尺寸的增加,其三维形貌逐渐复杂化,部分大尺寸缺陷呈链状,且扭曲程度更大;空间分布上,缺陷沿着厚度方向的分布主要集中于试样内部,部分大尺寸缺陷位于近表面;焊缝各区域的缺陷分布上,熔合区缺陷分布相对稀疏,热影响区的缺陷分布相对密集。因此,从缺陷表征的结果来看,热影响区缺陷相对集中,该区域的疲劳性能可能相对较弱。

2.4　缺陷尺寸的极值统计

含缺陷试样的疲劳失效一般认为是发生在最

大缺陷处,数量占比较高的规则小尺寸缺陷不是重点考虑的对象,因此在针对含缺陷材料的疲劳性能研究中,缺陷最大尺寸是一项关键参数。

极值统计法是利用有限样本来预测极值分布的一种统计学方法,实际情况下对所有焊接接头开展无损检测并对试件的内部缺陷尺寸进行分析,时间与经济成本较高,可操作性上存在一定难度。因此通过统计学极值统计的方法对最大缺陷尺寸开展预估是一种相对可行的方法。

分区取值法(BlockMethod,BM),是一种常见的极值统计分析方法,首先划分若干互不干涉的子样本空间,然后在每个子样本中求取缺陷尺寸最大值,进而利用子样本的极大值数据进行分布拟合,推断分布函数的相关参数,整体思路是利用子样本的极值分布来预测总体数据分布特征[18-19]。

在极值分布中假设缺陷尺寸 φ 服从某一特定分布,缺陷的极大值近似服从耿贝尔分布(Gumbel),分布函数如下所示。

$$G(\varphi)=\exp(-\exp(-(\varphi-\lambda)/\alpha)) \tag{3}$$

式中:$G(\varphi)$为缺陷的最大尺寸不超过 φ 的概率;α 和 λ 分别为 Gumbel 分布的尺度与位置参数,令

$$\psi=(\varphi-\lambda)/\alpha \tag{4}$$

则公式可简化为

$$G(\varphi)=\exp(-\exp(-\psi)) \tag{5}$$

分析统计每一子样本区间中缺陷尺寸的最大值记为 $\varphi_{\max}$,将所有子样本中的缺陷尺寸最大值按照从小到大的顺序重新排列,并按序排列$i=1,2,\cdots,N$,于是有 $\varphi_{1\max}\leqslant\varphi_{2\max}\leqslant\cdots\leqslant\varphi_{N\max}$,那么第 i 个缺陷的尺寸不超过 φ_j的累积概率可以如下表示

$$G(\psi_i)=i/(N+1) \tag{6}$$

代入式(5)反解得到

$$\psi_i=-\ln(-\ln(i/(N+1))) \tag{7}$$

利用已知数据建立 $\varphi_{i,\max}-\psi_i$ 的关系曲线,即可得到 a 和 λ 参数。

参考上述流程,将检测试样沿扫描长度方向划分为 12 个互不重合的立方体区域,对每个样本分析求得该样本缺陷最大尺寸。将缺陷尺寸按从小到大的顺序进行重新排列,每个子样本中最大缺陷特征尺寸记为 a_i,则第 i 个子样中缺陷最大特征尺寸 a_i的累积概率可表示为

$$G(a_i)=i/(n+1)=\exp[-\exp(-(a_i-\lambda)/\alpha)] \tag{8}$$

式中 a_i为各子样中最大缺陷特征尺寸按照升序排列的第 i 个缺陷值,对其求反函数

$$a_i=\alpha\cdot[-\ln(-\ln(G(a_i)))]+\lambda \tag{9}$$

将 a_i 与对应的$-\ln(\ln(G(a_i)))$做最小二乘法进行线性拟合,拟合情况及相关性如图 12 所示,通过拟合直线的关系式,可以得到参数 a 和 l 的具体数值,试件的相关数据如表 1 所示。

表 1　焊缝最大缺陷特征尺寸统计

子样编号 i	a_i/μm	$G(a_i)$	$-\ln(-\ln(G(a_i)))$
1	95.18	0.077	−0.942
2	96.91	0.154	−0.627
3	98.22	0.231	−0.383
4	98.83	0.308	−0.164
5	99.02	0.385	0.046
6	104.37	0.462	0.257
7	106.07	0.538	0.480
8	109.07	0.615	0.723
9	109.31	0.692	1.000
10	110.34	0.769	1.338
11	111.09	0.846	1.789
12	116.63	0.923	2.525

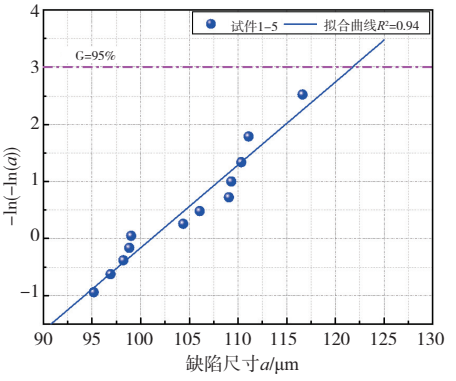


图 12　焊缝缺陷最大尺寸分布规律

将拟合参数代入式(9)即能得到 BM 法预测最大缺陷尺寸的计算表达式,即

$$a=6.878\cdot[-\ln(-\ln(G(a)))]+101.087 \tag{10}$$

在对最大缺陷特征尺寸估计中,取 $G(a)=95\%$,即在本次进行测试焊接接头中,缺陷特征尺寸小于估计值的概率为 95%。将其代入式(10)计算可知,缺陷的最大特征尺寸估计值约为 121.45 μm。

3　基于缺陷的疲劳强度评估

Kitagawa 和 Takahashi 将断裂力学和基于名义应力方法相结合,建立 K-T 图,用以描述缺陷尺寸与疲劳强度的关系。K-T 图的横纵坐标分别

表示疲劳极限和缺陷尺寸,标准K-T图由水平线段和斜线段组成,水平线段表示近似无缺陷材料的疲劳极限,斜线段由长裂纹扩展的门槛值和疲劳极限确定,线段所包围的区域称为非扩展裂纹区域,该区域内焊接接头能够安全服役,线段的交点表示安全缺陷尺寸[20-21],小于该尺寸的缺陷可不考虑其对疲劳性能的影响。由于近似无缺陷材料的疲劳极限通常难以获得,本文考虑以焊接母材的疲劳极限代替。随着缺陷尺寸的增加,应力强度因子ΔK趋近于长裂纹扩展门槛值ΔK_{thL},两者相等时,对应缺陷尺寸即为安全值,如下式所示,即

$$\begin{cases}\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \leqslant \Delta K_{\mathrm{thL}} \\ \Delta\sigma_{\mathrm{e}} = \dfrac{\Delta K_{\mathrm{thL}}}{Y\sqrt{\pi a}}\end{cases} \tag{11}$$

式中Y为与缺陷位置有关的参数,表面缺陷$Y=0.65$,内部缺陷$Y=0.5$,通过实验测试得到的母材相关参数$\Delta\sigma_0 = 660$ MPa,$\Delta K_{\mathrm{thL}} = 6.65$ MPa·$\mathrm{m}^{1/2}$。代入标准K-T图如图13所示,可以看到对应的安全缺陷尺寸约为96 μm,结合极值统计结果预估的焊接接头疲劳强度约为600 MPa。

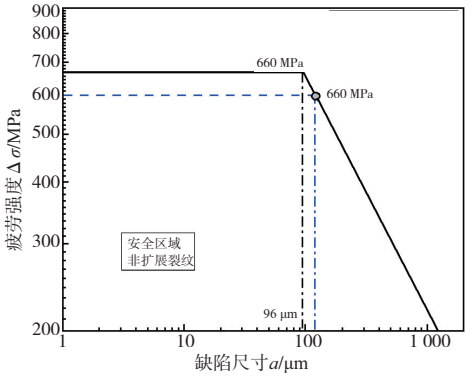


图13　焊接接头的K-T图及EI-Haddad模型

4　结语

本文针对1Cr11Ni2W2MoV氩弧焊接头,采用X-CT开展了焊接接头的缺陷检测,并利用三维重构的方法分析了焊缝缺陷的形貌、尺寸与分布规律,通过统计分析建立了缺陷尺寸和疲劳强度的关系,相关结论如下:

1)焊接接头缺陷检测及三维重构的结果表明,焊接缺陷以形貌规则的小尺寸缺陷为主,随着缺陷尺寸的增加,缺陷形貌趋于复杂,扭曲程度增大。

2)关于焊接缺陷的分布,缺陷主要集中在焊缝内部,部分大尺寸缺陷靠近焊缝表面;在焊缝各区的分布上,焊接热影响区的缺陷分布相对集中,因此热影响区的疲劳性能相对较弱。

3)通过极值统计分析,焊接缺陷尺寸的极大值约为121.45 μm,结合K-T图对焊接接头的疲劳强度进行了预估,当前制造条件下,标准K-T图预测的焊缝疲劳强度约为600 MPa。

参考文献:

[1] 刘军,孟宪国,李晨曦,等. 2219-T651铝合金激光摆动焊接接头微观组织和力学性能[J]. 焊接学报,2023,44(4):7-13.

[2] 马景平,曹睿,周鑫. 高强钢焊接接头疲劳寿命的提高方法进展[J]. 焊接学报,2024,45(10):115-128.

[3] 张勇,陈子壮,袁少波,等. 焊接接头疲劳评价进展[J]. 兵器材料科学与工程,2023,46(4):134-141.

[4] 赵秋,唐琨,黄冠铭,等. 对接焊缝初始缺陷对疲劳寿命影响规律研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(4):473-480.

[5] 罗振轩,周保成,唐伟琴,等. 基于缺陷表征的增材制造$AlSi_{10}Mg$合金疲劳强度预测方法[J]. 塑性工程学报,2024,31(12):222-228.

[6] 谢琦,王娜,杨雅静,等. 含缺陷钢结构焊接接头检测与评估[J]. 机械工程学报,2021,57(24):223-232.

[7] Aigner R,Pusterhofer S,Pomberger S,et al. A probabilistic Kitagawa - Takahashi diagram for fatigue strength assessment of cast aluminium alloys [J]. Materials Science and Engineering:A,2019,745:326-334.

[8] Begemann F,Müller J,Unglaub J,et al. Welding under service conditions—Resulting weld quality and fatigue strength assessment[J]. Engineering Failure Analysis,2024,160:108142.

[9] 吴磊,陈洪恩,曹柏亮,等. 基于工业CT技术的多孔材料焊接形貌分析[J]. 粉末冶金工业,2023,33(5):151-157.

[10] 方涛. 焊接技术中常见的缺陷、检验及其解决措施分析[J]. 舰船科学技术,2021,43(18):211-213.

[11] Wu S C,Xiao T Q,Withers P J. The imaging of failure in structural materials by synchrotron radiation X-ray microtomography[J]. Engineering Fracture Mechanics,2017,182:127-156.

[12] Wang P,Liu Y Z,Chen Z H,et al. Fatigue propagation behavior and interaction mechanism of internal multiple cracks for 6082 - T6 aluminum alloy joints [J]. Structures,2025,80:109992.

[13] Zerbst U,Madia M,Klinger C,et al. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. II:Non-metallic inclusions[J]. Engineering Failure Analysis,2019,98:228-239.

(下转第95页)

技术,静压导轨的性能与可靠性有望得到进一步提升,朝着更高刚度、更高精度的方向发展。

参考文献:

[1] 沈晓庆,翁泽宇,杨托,等. 数控机床滚动导轨结合面参数的特性分析[J]. 机械制造,2009,47(2):30-32.

[2] 闫海鹏,赵乐,吕月飞,等. 高速数控磨床的横、纵向进给设计[J]. 煤矿机械,2015,36(2):58-61.

[3] 陈友侃,严名康. 大型平面磨床上的静压导轨技术[J]. 磨床与磨削,1993(4):56-58.

[4] 赵建华,高殿荣,张作超. 位移干扰下液体静压导轨的被动振动分析[J]. 振动工程学报,2013,26(5):693-699.

[5] 张艳芹,冯雅楠,孔鹏睿,等. 基于热油携带的静压支承油膜温度场及试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,49(4):1203-1211.

[6] 成大先,王德夫,韩学铨,等。机械设计手册:第5版[M]. 北京:化学工业出版社,2008.

[7] 武鹏飞,高峰,李艳. 考虑节流形式的液体静压导轨油膜动刚度建模研究[J]. 机床与液压,2020,48(14):142-145,151.

[8] 王东锋. 液体静压导轨及其设计研究[J]. 润滑与密封,2004,29(4):117-118,127.

[9] 王丹,郑凯,张子珩. 基于AMEsim的机床非对称液压系统的优化设计[J]. 机械制造与自动化,2025,54(4):63-67.

[10] 教传艳,吴敬. 磨床工作台导轨副改进及维修[J]. 机床与液压,2014,42(20):173.

[11] 潘慧,范晓,金伟峰,等. 直线电机驱动的开式静压导轨的设计[J]. 机床与液压,2012,40(13):129-131.

[12] 刘强,梁文勇. 微量进给结构的研究和应用[J]. 机械研究与应用,2008,21(5):29-30.

[13] 江洁. 重型立车提高承载能力改造中静压导轨分析选用与设计[J]. 机床与液压,2016,44(20):177-180.

[14] 韩明礼. 精密数控机床静压导轨的设计及FLUENT分析[D]. 沈阳:东北大学,2011.

[15] 刘志丹,王时龙,李川,等. 大型滚齿机工作台静压导轨的压力油流场数值模拟[J]. 四川兵工学报,2010,31(5):48-50,55.

[16] 于晓东,吴晓刚,隋甲龙,等. 静压支承摩擦副温度场模拟与实验[J]. 推进技术,2016,37(10):1946-1951.

[17] 吴辉钢,熊树根,杜雄. 矩形闭式静压导轨装配调试与性能评价[J]. 精密制造与自动化,2023(4):1-4.

[18] 郑永,王辉,陈艳,等. 定压供油式数控滚齿机静压导轨流体仿真[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(5):80-84,134.

收稿日期:2026-02-04

(上接第32页)

[14] Syed A K, Vesga W, Dutton B, et al. Defect tolerance and fatigue limit prediction for laser powder bed fusion Ti_6Al_4V[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 184:108285.

[15] Garb C, Leitner M, Stauder B, et al. Application of modified Kitagawa-Takahashi diagram for fatigue strength assessment of cast Al-Si-Cu alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111:256-268.

[16] Wu S C, Song Z, Kang G Z, et al. The Kitagawa-Takahashi fatigue diagram to hybrid welded AA7050 joints via synchrotron X-ray tomography[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 125:210-221.

[17] Wu S C, Hu Y N, Song Z, et al. Fatigue behaviors of laser hybrid welded AA7020 due to defects via synchrotron X-ray microtomography[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2019, 42(10):2232-2246.

[18] Beretta S. More than 25 years of extreme value statistics for defects: Fundamentals, historical developments, recent applications[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 151:106407.

[19] Serjouei A, Shahtahmassebi G. Statistical distributions of morphologically classified defects in metal additive manufacturing with implications for fatigue life prediction[J]. Advanced Engineering Materials, 2025, 27(15):2402848.

[20] 满铮. 含缺陷高强钢焊接接头疲劳寿命可靠性评价[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.

[21] 吴正凯,吴圣川,张杰,等. 基于同步辐射X射线成像的选区激光熔化Ti-6Al-4V合金缺陷致疲劳行为[J]. 金属学报,2019,55(7):811-820.

收稿日期:2024-05-15