

TA15 钛合金电子束焊缝形状对疲劳性能的影响研究

Investigation of Effect of Weld Shape on Fatigue Performance of TA15 Electron Beam Welded Joint

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室 刘 昕 唐振云

[摘要] 通过选用适当的电子束焊接工艺,可得到 4 种典型的电子束焊缝形状,分别为钟罩形、漏斗形、楔形和钉形。对不同焊缝形状的电子束焊接接头进行了疲劳性能试验,并利用所建立的层次分析数学模型,综合评价了焊缝形状对疲劳性能的影响。

关键词: 焊缝形状 电子束焊接 疲劳性能 层次分析法

[ABSTRACT] Four different weld shapes are obtained by proper electron beam welding parameters, which are respectively named as bell shape, funnel shape, nail shape, and wedge shape. Fatigue performance examinations of the electron beam welded joints with different shapes are carried out. The influence of weld shape on mechanical performance of the joints is synthetically evaluated by analytic hierarchy mathematical model.

Keywords: Weld shape Electron beam welding Fatigue performance Analytic hierarchy process

钛合金由于具有比强度高、耐腐蚀性好、耐高温、使用性能好等优点,在航空、航天、汽车等领域中得到了迅速发展,并成为当代飞机和发动机的主要结构材料之一^[1]。其中,TA15 钛合金具有中等的室温和高温强度、良好的热稳定性和焊接性能,主要用于制造 500℃ 以下长时间工作的飞机与发动机零件和焊接承力零部件。

真空电子束焊接技术可实现真空环境下焊接,其焊缝纯净、质量高、深宽比大、变形小,已成为钛合金焊接的主要方法之一。因此,钛合金电子束焊接接头的力学性能,特别是疲劳性能,是航空制造领域技术人员所关注的对象。影响接头性能的因素很多,而焊缝形状由于直接反映了焊接质量、焊接工艺参数的合理性及焊接参数控制的稳定性,已成为影响焊接接头组织与性能的重要因素之一^[2]。因此,研究焊缝形状对电子束焊接接头疲劳性能的影响具有实际应用意义,并且进行焊缝形状对接头疲劳性能影响的综合评价可为设计人员提供重要的参考依据。

层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)是一

种较好的权重确定方法。它是把复杂问题中的各因素划分成相关联的有序层次,使之条理化的多目标、多准则的决策方法,是一种定量分析与定性分析相结合的有效方法^[3]。它可代替传统的权重直接取定法^[4],既保证了定性科学性和定量分析的精确性,又保证了定性和定量综合评价的统一性。在人机界面、行业选择、绩效评估指标权重、矿业、网络优化等方面得到了广泛应用^[5-7]。在评价焊缝形状对接头疲劳性能的影响时,仅考虑其对疲劳寿命的影响是不够的,因为不同焊缝形状对疲劳寿命的分散程度也有一定的影响,而应用层次分析法进行综合评价将会取得较好的实际效果。

本文研究了焊缝形状对 20mm 厚板 TA15 钛合金电子束焊接接头疲劳性能的影响,并建立层次评价模型,采用层次分析法确定各因素的权重,从而使综合评价更具有客观性。

1 试验方法及条件

1.1 试验材料

试验所用的钛合金为 TA15,其主要合金元素组成如表 1 所示,焊接试板尺寸为 250mm × 200mm × 20mm。

表1 试验材料的化学成分(质量分数) %

合金元素	Al	Zr	Mo	V	Ti
	5.5~7.0	1.5~2.5	0.5~2.0	0.8~2.5	余量
杂质(≤)	Fe	Si	C	N	H
	0.25	0.15	0.10	0.05	0.015
	O	其余	-	-	-
	0.15	0.30	-	-	-

1.2 试验条件

焊接在 ZD150-15A 高压型电子束焊机上进行。沿平行焊缝横截面的方向截取板状力学性能试样,如图 1 所示。采用这种方法可尽可能地保留焊缝横截面的形貌,以利于研究焊缝形状对疲劳性能的影响。疲劳试验在 MTS810 实验机上进行,应力水平为 0.6,试验频率为 20Hz,三角形波,加载方式为轴向加载,应力比 $R=0.1$ 。采用层次分析法对疲劳性能试验结果进行综合评价,并

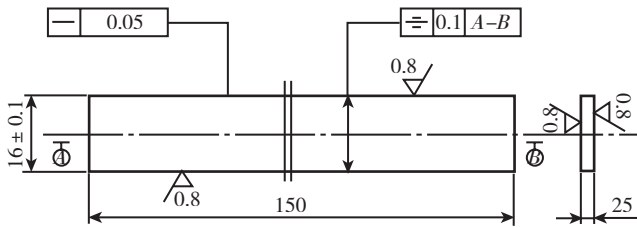


图1 力学性能试样尺寸

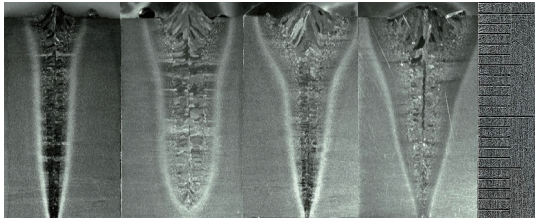
Fig.1 Dimensions of mechanical property specimen

使用 MATLAB 进行矩阵的计算。

2 试验结果及分析

2.1 焊缝形状分类

通过工艺试验研究,TA15 钛合金电子束焊后,可获得如图 2 所示的 4 种典型的焊缝形状。按照其几何特征分别命名为钉形、钟罩形、漏斗形和楔形。



钉形 钟罩形 漏斗形 楔形

图2 典型焊缝形状照片

Fig.2 Photograph of typical weld shapes

2.2 焊缝形状对疲劳性能的影响

图 3 给出了 TA15 钛合金 4 种典型形状接头的疲劳性能对比结果。从图中可以看出,以中值疲劳寿命从大到小的顺序,4 种形状接头依次为: 漏斗形 > 钟罩形 > 楔形 > 钉形。以试验数据的分散性从大到小的顺序,4 种形状接头依次为: 楔形 > 钉形 > 漏斗形 > 钟罩形。在

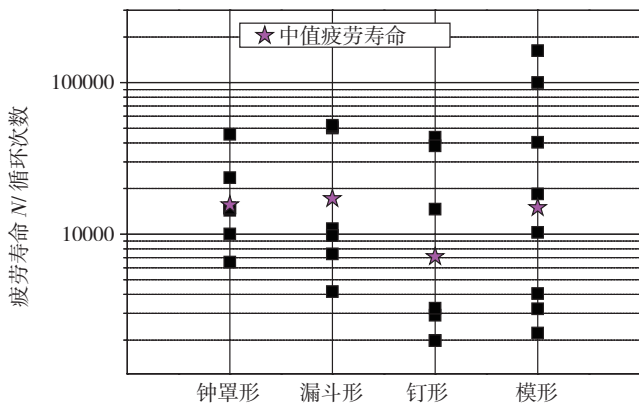


图3 TA15 钛合金不同形状接头的疲劳性能对比

Fig.3 Comparison of fatigue performance of TA15 welded joints with different shapes

实际的应用中,希望接头的疲劳寿命越高越好,而试验数据标准差越低越好。那么如何根据上述的疲劳试验结果,综合考虑到中值疲劳寿命和试验数据标准差,来评价焊缝形状对接头疲劳性能的影响? 本文提出了层次分析法进行综合评价。

2.3 AHP 综合评价

2.3.1 AHP 原理及优势

层次分析法是美国运筹学家 T. L. Saaty 教授于 20 世纪 70 年代初期提出的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法。其解决问题的基本思路和基本原理是: 首先,把要解决的问题分层系列化,即根据问题的性质和要达到的目标,将问题分解为不同的组成因素,按照因素之间的相互影响和隶属关系将其分层聚类组合,形成一个递阶的、有序的层次模型; 然后,对模型中每一层次因素的相对重要性,依据人们对客观现实判断给予定量表示,再利用数学方法确定每一层次全部因素相对重要性次序的权值; 最后,通过综合计算各因素相对重要性的权值,得到最低层(方案层)相对最高层(总目标)相对重要性次序的组合权值,以此作为评价和选择方案的依据^[8]。

AHP 最大的优点是可以处理定性和定量相结合的问题,从本质上讲 AHP 是一种科学的思维方式。在评价焊缝形状对接头疲劳性能的影响时,仅考虑焊缝形状对疲劳寿命的影响是不够的,因为不同焊缝形状对接头疲劳寿命的分散程度也有一定的影响。

2.3.2 分层结构模型的建立

本层次分析结构分为目标层、准则层和决策层 3 个部分。目标层是接头的疲劳性能。选择了 2 个疲劳性能指标作为焊缝形状对接头疲劳性能影响综合评价的基本因素,即中值疲劳寿命和试验数据标准差。其中,标准差越小,说明试验数据分散性越小,数据的一致性越好。因此,准则层是中值疲劳寿命、试验数据标准差。决策层是焊缝的 4 种典型形状。所建立的层次分析的结构模型,如图 4 所示。

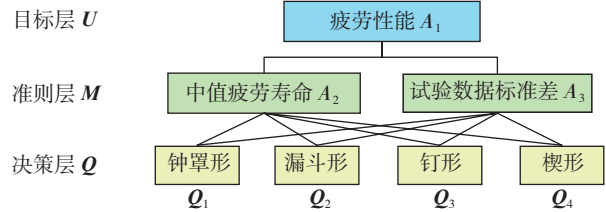


图4 层次结构模型

Fig.4 Analytic hierarchy model

2.3.3 构造判断矩阵

判断矩阵为 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 其一般形式是:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,第 i 行数据表示判断时以第 i 个指标为基础,该 i 指标与其他 $n-1$ 个指标相比较的相对重要程度。依据各评价因素的试验结果,同时认为各因素在疲劳性能评价中同等重要,由 Satty 标度原则给出各因素的标度值(可查表获得^[8]),进行两两因素间量化并比较,得出判断矩阵。

疲劳性能判断矩阵 A_1 :

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

中值疲劳寿命判断矩阵 A_2 :

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 7 & 1 \\ 2 & 1 & 9 & 2 \\ 1/7 & 1/9 & 1 & 1/6 \\ 1 & 1/2 & 6 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

试验数据标准差判断矩阵 A_3 :

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 8 & 9 \\ 1/6 & 1 & 3 & 4 \\ 1/8 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/9 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}。 \quad (4)$$

2.3.4 判断矩阵的一致性检验

为保证判断思维的逻辑一致性,确保层次分析法的结论基本合理,必须对判断矩阵进行一致性检验。其一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ 。如果 $CI = 0$,则表明该判断矩阵具有完全一致性。若 $CI \neq 0$,则需进行随机一致性比率 $CR = CI / RI$ 的计算,其中 RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标,可查表获得。当 $CR < 0.1$ 认为判断矩阵的不一致程度在容许范围之内,可用其特征向量作为权向量;否则重新进行成对比较,对判断矩阵加以调整^[9]。对判断矩阵进行一致性检验,其结果如表 2 所示。根据计算结果可知,上述矩阵满足一致性条件。

表2 一致性检验结果

判断矩阵	A_1	A_2	A_3	Ti
λ_{\max}	2	4.0189	4.1341	H
CI	0	0.0063	0.0447	0.015
RI	-	0.9	0.9	-
CR	-	0.007	0.0497	-

2.3.5 评价指标间权重的确定

对上述 3 个矩阵分别计算出单一准则下相对排序权重 $W_1 \sim W_3$ 。

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.7071 \\ 0.7071 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} 0.4401 \\ 0.7892 \\ 0.0732 \\ 0.4219 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$W_3 = \begin{bmatrix} 0.9599 \\ 0.2475 \\ 0.1101 \\ 0.0714 \end{bmatrix}。 \quad (7)$$

根据以上结果计算各层元素对目标层的总排序权重(即组合权重) W 如下:

$$W = (W_2, W_3) W_1 = \begin{bmatrix} 0.4401 & 0.9599 \\ 0.7892 & 0.2475 \\ 0.0732 & 0.1101 \\ 0.4219 & 0.0714 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.7071 \\ 0.7071 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9899 \\ 0.7331 \\ 0.1296 \\ 0.3488 \end{bmatrix}。 \quad (8)$$

2.3.6 AHP 的评价结果

根据层次分析法计算,得到表 3 的结果。表中,组合权向量的数值越大说明权重越大,表明该接头的疲劳性能就越优。因此,从组合权向量数据可以看出,4 种形状接头的疲劳性能排序为:钟罩形 > 漏斗形 > 楔形 > 钉形。这说明钟罩形接头的疲劳性能优于其它形状接头的疲劳性能。以中值疲劳寿命为例,根据权向量数值大小排序可知,漏斗形 > 钟罩形 > 楔形 > 钉形,此结果与实际中值疲劳寿命对比结果完全一致,这证明了本层次分析数学模型的合理性和有效性。

表3 不同焊缝形状接头的疲劳性能评价结果

权向量 (Q 对 M)	权向量(M 对 U)		
	中值疲劳寿命 0.7071	数据标准差 0.7071	组合权向量 (Q 对 U)
钟罩形 Q_1	0.4401	0.9599	0.9899
漏斗形 Q_2	0.7892	0.2475	0.7321
钉形 Q_3	0.0732	0.1101	0.1296
楔形 Q_4	0.4219	0.0714	0.3488

3 结论

(1) 不同的焊缝形状对接头的疲劳性能有一定的影响。

(2) 应用所建立的层次分析法数学模型,可综合评价焊缝形状对疲劳性能的影响。其评价结果表明,钟罩形接头的疲劳性能优于其他形状接头的疲劳性能。并且与试验结果验证表明,所建立的层次分析法数学模型

(下转第 124 页)

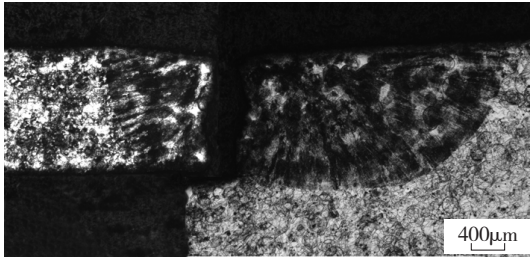


图8 排气段隔板焊缝形貌 (50X)
Fig.8 Weld penetration morphology of clapboard

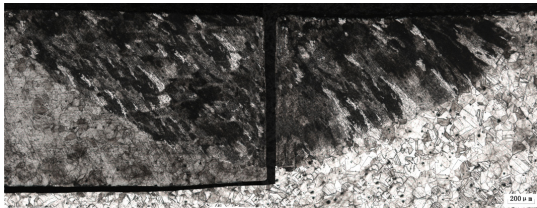


图9 排气段隔板未焊透形貌 (50X)
Fig.9 Weld no throughout morphology of clapboard

(3)通过对排气段隔板焊缝部位的外观、断口和金相剖切检查:排气段隔板焊缝处存在断裂痕迹,断面沿板厚方向深浅不一,为疲劳特征。由此可见,排气段隔板与其配合件排气段已形成熔合面,但断口深度均小于板厚深度。结合焊缝金相检查,结果表明排气段隔板存在未焊透现象。

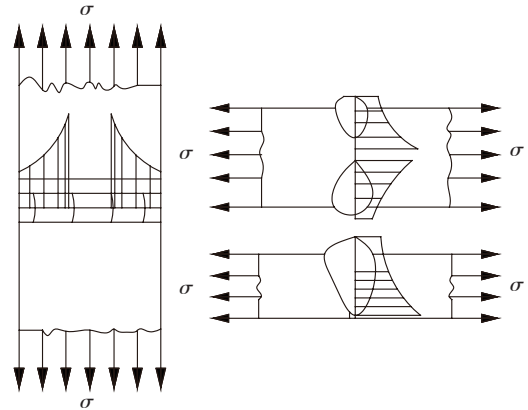
(4)未焊透指在焊接时接头根部未完全焊透。未焊透对焊接结构件来说直接的危害是减少承载面积,降低焊接接头的力学性能,其引起的应力集中远比强度降低的危害性大。承受交变载荷、冲击载荷、应力腐蚀或低温下的工作焊接结构,常常由此导致脆性断裂。

(5)通常,未焊透在焊接缺陷中是被当作二维缺陷来处理的,人们把它当作裂纹情况来研究,图10(a)为焊缝内部存在未焊透时的应力分布,由图可见,未焊透尖端形成的峰值应力区。未焊透在板厚度方向的应力分布见图10(b),由图可见板厚度方向上也造成严重的应力集中,并显著削弱了承载截面^[2]。

(6)正常情况下,排气段隔板主要承受排气气流的冲击力以及震动应力,该力不足于导致排气段隔板脱落;但是如果在排气段隔板与其配合件在焊接时出现未焊透或焊接熔化深度不均等缺陷的情况,就容易产生应力集中及强度下降等现象,形成破断缺口^[3]。在气流冲击力下导致排气段隔板未焊透处产生疲劳源,随着时间的延长裂纹加速扩展,导致整个排气段隔板断裂。

3 结论

该发动机排气段隔板脱落的原因是焊缝存在未焊透,导致工作过程中疲劳断裂脱落。



(a)在板长度方向上 (b)在板厚度方向上

图10 未焊透引起的应力集中

Fig.10 Stress centralization caused by no throughout of welding

参考文献

- [1] 张栋. 失效分析. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [2] 李亚江. 焊接缺陷分析与对策. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [3] 张栋. 机械失效的实用学分析. 北京: 国防工业出版社, 1995.

(责编 亦非)

(上接第 121 页)

具有合理性和有效性。

参考文献

- [1] Ahmada M, Akhtera J I, Akhtara M, et al. Microstructure and hardness studies of the electron beam welded zone of Hastelloy C-276. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, 31(8): 88-93.
- [2] 刘森, 辛希贤. 螺旋埋弧焊管焊缝形状控制与优化数据库. *石油矿场机械*, 2006, 35(6): 58-61.
- [3] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究. *武汉理工大学学报*, 2007, 29(1): 153-156.
- [4] Zhong J M, Li D F. Application research on rough set and analytic hierarchy process in fuzzy comprehensive evaluation. 2008 IEEE International Symposium. Xiamen, 2008:66-70.
- [5] Ataei M, Jamshidi M, Sereshki F. Mining method selection by AHP approach. *Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy*, 2008, 108(12):741-749.
- [6] 张志强, 徐斌, 何勇灵, 等. 基于 AHP 评价方法的发动机性能评价. *兵工学报*, 2008, 29(5): 625-628.
- [7] 徐俊, 刘娜. 层次分析法的基本思想与实际应用. *情报探索*, 2008(12): 113-115.
- [8] 胡燕, 叶景才, 杨春. 基于层次分析法的材料力学性能评价模型. *计算机与数字工程*, 2008, 36(12): 16-19.
- [9] 严世华, 田效. 基于层次分析法的判断矩阵一致性调整方法. *武器装备自动化*, 2008, 27(4): 8-10.

(责编 亦非)