

民用航空发动机 TA19 电子束焊疲劳试验

宋 利, 杨俊杰, 陈铁峰

(中国航空工业集团公司 商用航空发动机有限责任公司 研发中心, 上海 201109)

摘 要: 针对民用航空发动机钛合金整体叶盘常用材料 TA19 开展其母材试件与电子束焊焊接试件在 20, 300, 450 °C 的疲劳试验, 通过焊接试件的焊缝材料断口与母材断口形貌的比较探讨了焊缝材料的疲劳破坏机理, 并在 $10^4 \sim 10^6$ 循环的疲劳寿命区间内采用 Basquin 模型分别建立了焊缝材料和母材的应力-疲劳寿命(S-N)曲线, 结果显示母材试件与焊接试件的试验疲劳寿命大部分都落在了对应模型计算疲劳寿命的 2 倍线之内, 表明试验得到的 S-N 曲线是合理的. 焊接试件与母材试件的 S-N 曲线的对比分析表明, 20 °C 时焊接试件的疲劳性能比母材试件略高, 而在 300 °C 和 450 °C 时焊接试件与母材试件的疲劳性能差异随应力水平发生变化. 但总地说来, 在所关注疲劳寿命区间内, 母材试件与焊接试件的计算疲劳寿命差异也在 2 倍线以内, 初步表明两者的疲劳性能相当.

关 键 词: TA19; 电子束焊; 疲劳试验; Basquin 模型; S-N 曲线

中图分类号: V250.3

文献标志码: A

Fatigue test of electron beam welding for TA19 in civil aircraft engine

SONG Li, YANG Jun-jie, CHEN Tie-feng

(Research and Development Center, Commercial Aircraft Engine Company Limited,
Aviation Industry Corporation of China, Shanghai 201109, China)

Abstract: Fatigue test for welding specimen of electron beam welding and base metal specimen of TA19, which was made of titanium-based alloy often used in the blisk of civil aircraft engine, was performed at temperature 20, 300, 450 °C. Fracture mechanism of welded joint was discussed by comparing the fracture face microstructures of welded metal with that of base metal. Then the stress-fatigue life (S-N) curves of both base metal and welded metal were created based on Basquin model in the fatigue life range of 10^4 to 10^6 cycles, showing that few test data of fatigue life can go beyond the two times error margin in the corresponding models, which indicates that the S-N curve obtained by test is reasonable. Through comparison of the S-N curves of welding specimen and base metal specimen, it can be seen that fatigue performance of welding specimen is higher than that of base metal specimen at temperature 20 °C, while the differences of the fatigue performance between welding specimen and base metal specimen vary with the stress amplitude at temperature 300 °C and 450 °C. Also, in above fatigue life range, the differences of calculated life prediction for welding specimen and base metal specimen are within the two times error margin. Thereby, the conclusion can be drawn that the fatigue performances of both are closer.

Key words: TA19; electron beam welding; fatigue test; Basquin model; S-N curve

民用航空发动机结构中广泛采用焊接工艺,能够有效减轻结构质量,提高结构性能。当前高压压气机转子鼓筒之间的焊接主要有惯性摩擦焊(inertia friction welding, IFW)和电子束焊(electron beam welding, EBW)两种工艺。其中,GE公司用惯性摩擦焊作为焊接的主要工艺,R-R公司在Trent系列中一直采用电子束焊,尤其是针对钛基合金部件^[1-5]。

目前,民用大涵道比涡扇发动机的高压压气机前几级中大量使用钛合金整体叶盘。惯性摩擦焊的焊接质量好,但在焊接时需要较大的挤压应力,并且存在焊后缩短量不易控制、加工余量大、工装成本高等缺点;而电子束焊焊接接头的性能虽不及惯性摩擦焊,但其焊后加工余量小,成本较惯性摩擦焊低,工艺适应性强。因此,对于钛合金整体叶盘鼓筒之间的焊接,电子束焊的优势较为明显。在国内,电子束焊已广泛应用于军用航空发动机转子连接,但在长疲劳寿命、高可靠性的民用航空发动机转子上还缺乏应用经验^[6-16]。国内对钛合金电子束焊焊接性能进行了广泛的研究,尤其是针对TC4材料,比如文献^[17-18]针对TC4的室温和高温下的组织和静强度及持久强度等性能进行了试验研究,结果表明对应性能不低于母材,或者相当。文献^[16]针对TC4电子束焊焊接接头的高周与低周疲劳性能进行了试验研究,结果表明焊缝的存在不会减弱焊接接头的高周疲劳强度,而低周疲劳试验试样的断裂位置并不确定。但是,国内针对TA19钛合金材料的电子束焊焊接接头的静强度以及疲劳性能的研究都较少。

为评估TA19的电子束焊工艺在民用航空发动机高压压气机转子连接中的可行性,验证其疲劳寿命(以下简称寿命,用 N_f 表示)与可靠性是否满足民用航空发动机的长寿命和高可靠性的要求,并为关键构件的结构完整性评估提供依据,必须基于相关结构的典型载荷特点,进行力学性能和疲劳性能的试验研究,量化TA19电子束焊焊接接头与母材之间疲劳性能上的差异。

1 钛合金电子束焊

钛合金由于其高比强特点,广泛应用在工作温度不高于450℃的航空发动机冷端部件中。某型民用航空发动机高压压气机整体叶盘采用TA19,该材料为一种近 α 型钛合金。电子束焊焊缝尺寸明显小于常见金属焊缝,焊缝宽度一般在2~5 mm之间,呈腰鼓形,如图1(a)所示。图1(b)

为焊缝与母材过渡区金相结构,焊缝与母材界限清晰可见,未发现明显的热影响区,也未发现明显的焊接缺陷。一般情况下,焊接工艺产生的焊缝及其附近的母材的微观结构会发生变化,并可能由此引起焊缝材料(welded metal, WM)性能与母材(base metal, BM)相比产生差异。图1(c)中焊缝材料金相结构与图1(d)中母材金相结构呈现明显差异,焊缝材料晶体明显变细,为 β 相材料, β 相晶粒依稀边界可见,在焊缝材料中已经观察不到原来母材的晶体结构。TA19母材金相结构如图1(d)所示, α 相晶粒尺寸在10~20 μm 之间,整体 $\alpha+\beta$ 相结构均匀。

TA19电子束焊焊缝处晶体结构的变化可能导致材料性能发生明显的改变。如果在采用电子束焊的结构设计中焊缝处仍然采用母材的材料性能数据,会使该处的寿命预测与性能评估不可靠。因此,为了保证民用大涵道比涡扇发动机的高压转子满足长寿命、高可靠性的要求,必须量化TA19电子束焊焊缝材料疲劳强度性能的变化,通过疲劳试验(以下简称试验)确定电子束焊焊缝材料的S-N曲线与寿命预测模型。

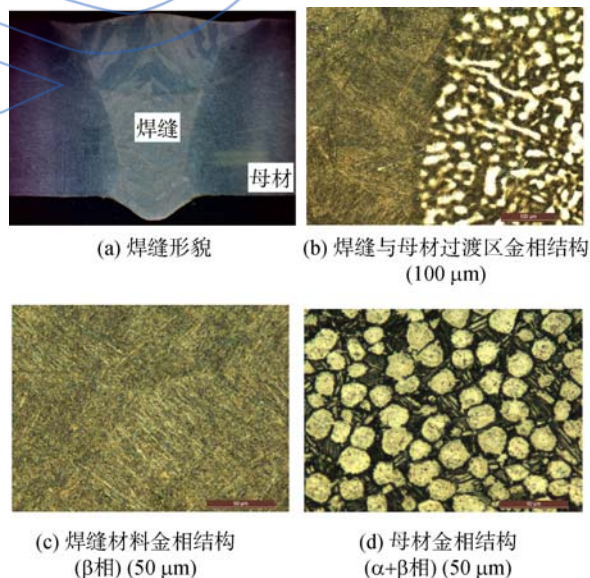


图1 焊缝材料与母材微观结构特征

Fig. 1 Microstructure characteristics of WM and BM

2 TA19 电子束焊试验

为量化焊缝材料与母材之间性能差异,尤其是疲劳性能的差异,必须分别针对母材试件和焊接试件在相同条件下(包括工艺条件和试验条件)开展试验。由于钛合金整体叶盘之间的电子束焊

焊接发生在鼓筒处,而鼓筒结构的厚度相对较小,可以看作薄壁结构.为尽可能模拟实际的结构特征,试验中不仅要求试件厚度接近于该发动机钛合金整体叶盘的鼓筒厚度,同时考虑到试件夹具的影响,试验采用 116 mm×226 mm×46 mm 的薄板试件,如图 2 所示.为了削弱钛合金整体叶盘鼓筒加工工艺对试验结果的影响,母材试件和焊接试件均按照鼓筒的实际加工工艺流程和工艺参数进行加工和焊接.

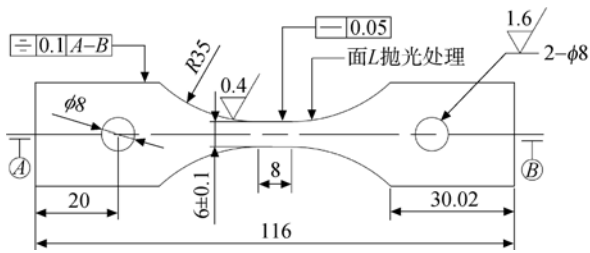


图 2 电子束焊试验试件(单位:mm)

Fig. 2 Specimens for test of electron beam welding
(unit:mm)

长寿命、高可靠性的民用航空发动机的高压压气机转子的寿命一般都在 10^4 循环以上,而钛合金整体叶盘鼓筒连接处的寿命约为 $10^5 \sim 10^6$ 循环,因此,母材试件与焊接试件的试验应该能够覆盖该寿命区间,本试验确定试验寿命在 $10^4 \sim 2 \times 10^6$ 循环之间,重点考察区域为 $10^4 \sim 10^6$ 循环.在该循环范围内,TA19 的塑性变形较小($\epsilon_a < 1\%$),而应力变化比较明显.因此,本试验采用应力控制疲劳载荷,根据试验结果拟合出母材和焊缝材料的寿命预测模型,并绘制出两者的 S-N 曲线.值得注意的是,由于薄板试件厚度太小,当试验应力比 $R = -1.0$ 时,试件往往在应力到达谷值时由于压应力太大而失稳,在高温下这种状况会更加突出.因此,本试验在高温下(t 为 300°C 和 450°C)仅做应力比 $R = 0.1$ 的试验,仅在室温(t 为 20°C)下进行母材试件和焊接试件 $R = -1.0$ 和 $R = 0.1$ 的试验,用来考察应力比 R 对材料 S-N 曲线的影响.试验应力幅 σ_a 和应力比 R 定义如下:

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2 \quad (1)$$

$$R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} \quad (2)$$

式中 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 分别表示最大应力和最小应力.试验在 250 kN 的轴向/扭转复合疲劳材料试验机 MTS809 上进行.试验条件与试件数量安排如表 1 所示,其中第 4 列表示在所关注的寿命区间 (10^4 循环 $< N_f < 10^6$ 循环)安排的试件个数,由于

主要是为了考察焊接试件疲劳性能,因此焊接试件的数量较多.

表 1 试验条件与试件数量

Table 1 Test conditions and specimen counts

试验条件	试件类型	试件总数/个	试件数/个
$R = 0.1, t = 20^\circ\text{C}$	母材试件	10	7
	焊接试件	19	11
$R = 1.0, t = 20^\circ\text{C}$	母材试件	9	6
	焊接试件	22	15
$R = 0.1, t = 300^\circ\text{C}$	母材试件	14	12
	焊接试件	24	15
$R = 0.1, t = 450^\circ\text{C}$	母材试件	8	6
	焊接试件	29	20

3 试验结果与分析

3.1 试件疲劳断口分析

比较 450°C 下母材与焊缝材料的断口,分别见图 3 和图 4.从图 3 中可以看出,TA19 母材断口呈现典型高强金属疲劳断裂形态,裂纹从表面起裂成核,疲劳裂纹扩展清晰可见,到临界裂纹长

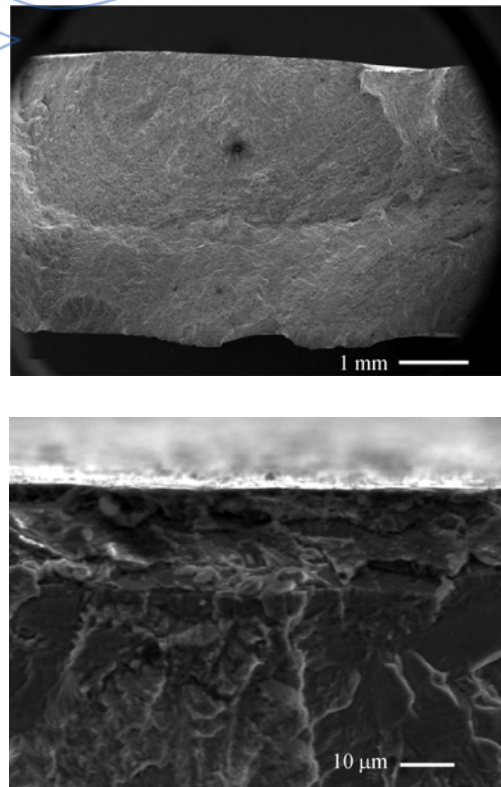


图 3 TA19 母材断口形貌

Fig. 3 Micrograph in fracture face of TA19 BM

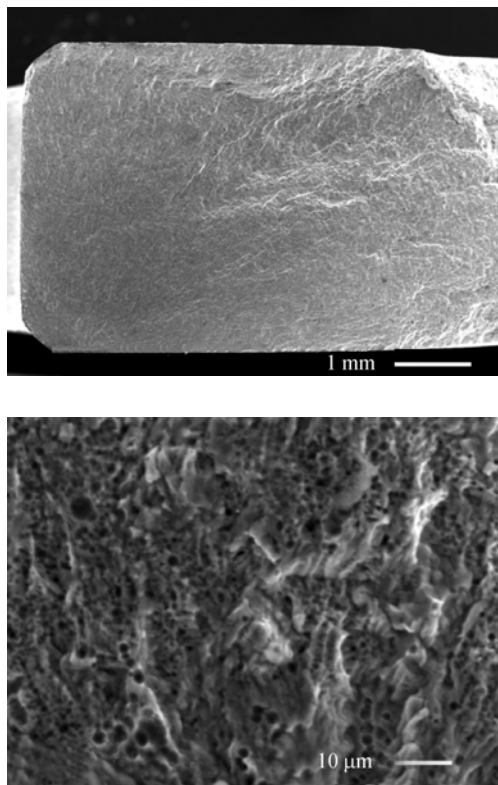


图4 TA19 焊缝材料断口形貌

Fig. 4 Micrograph in fracture face of TA19 WM

度,然后断裂,破坏过程比较脆,断口没有明显塑性变形.图4中焊缝材料断口的形貌与母材相似,在裂纹扩展的初期材料表现比较脆,断口表面存在大量的微观裂纹,其裂纹方向与主裂纹扩展方向垂直,表明微观裂纹起源于主裂纹,为主裂纹的分叉,由此可见焊缝材料的性能较母材延展性差.

其他温度(20℃和300℃)下的断口与450℃类似.总地看来,不同温度下电子束焊焊缝材料的断口形貌与母材断口形貌是相似,表明两者具有相同的疲劳断裂机理.

3.2 试验数据分析

在材料的疲劳分析中,人们常采用应力比 $R=-1.0$ 的试验数据来拟合材料的 S-N 曲线,然后结合 Goodman 公式等来纠正平均应力的影响.但由于该试验中钛合金薄板试件在高温(300℃与450℃)压应力下容易失稳,故在高温下仅进行应力比 $R=0.1$ 的试验.试验采用 Basquin 模型直接建立不同应力比下的寿命预测模型,如式(3)所示

$$\sigma_a = A(N_f)^b \quad (3)$$

其中 σ_a 为应力幅,本文中用来代表 S-N 曲线中的应力 N ; A 和 b 为模型常数,通过试验确定.对式(2)两边取对数,可得

$$\lg(\sigma_a) = \lg A + b \lg N_f \quad (4)$$

也即在双对数坐标系中,Basquin 模型所表述的 S-N 曲线是线性关系.

TA19 母材试件与焊接试件的试验结果见图5和图6.针对重点关注的寿命在 $10^4 \sim 10^6$ 循环之间的试验结果,采用最小二乘法拟合式(4)中的 $\lg A$ 和 b ,得到母材试件与焊接试件在不同温度和不同应力比下 Basquin 模型参数 A 和 b (见表2和表3),并分别绘制出母材试件和焊接试件对应的 S-N 曲线(见图5和图6).

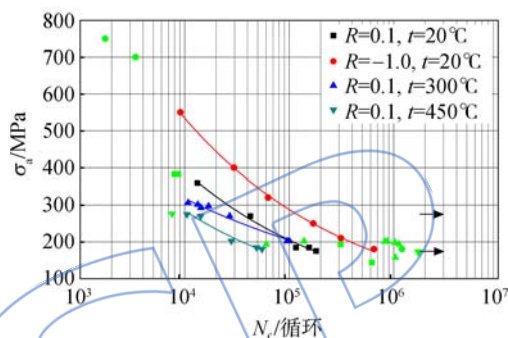


图5 TA19 母材试件试验数据与 S-N 曲线

Fig. 5 Test data and S-N curves of TA19 BM specimen

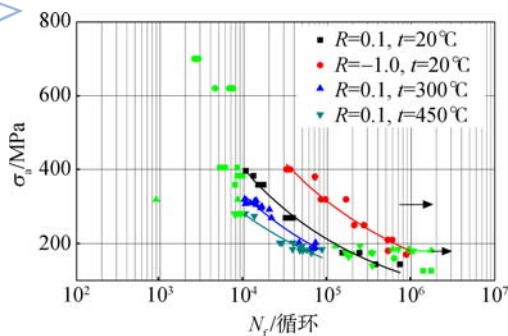


图6 TA19 焊接试件试验数据与 S-N 曲线

Fig. 6 Test data and S-N curves of TA19 welding specimen

表2 TA19 母材试件 S-N 曲线参数

Table 2 S-N curve parameters of TA19 BM specimen

试验条件	A/MPa	b
$R=0.1, t=20^\circ\text{C}$	5262.8	-0.28190
$R=-1.0, t=20^\circ\text{C}$	6366.6	-0.26898
$R=0.1, t=300^\circ\text{C}$	1849.4	-0.19119
$R=0.1, t=450^\circ\text{C}$	3687.3	-0.27825

表 3 TA19 焊接试件 S-N 曲线参数
Table 3 S-N curve parameters of TA19 welding specimen

试验条件	A/MPa	b
R=0.1, t=20℃	5 219.7	-0.278 52
R=-1.0, t=20℃	5 181.6	-0.243 44
R=0.1, t=300℃	4 469.3	-0.282 29
R=0.1, t=450℃	2 970.5	-0.256 07

从图 5 和图 6 中可以看出,在所关注的寿命区间,模型和试验结果比较吻合,表明了本文中 Basquin 模型的适用性.而在 $N_f > 10^6$ 循环时,尤其是在高温条件下,试件寿命已接近永久寿命,此时常规的寿命模型不再适用(图中水平箭头所示).通过图中不同温度下的 S-N 曲线的比较表明:Basquin 模型中的指数系数与温度的相关性比较明显.在室温条件下,不论是母材试件还是焊接试件, $R = -1.0$ 和 $R = 0.1$ 的 S-N 曲线平行性较好,表明 Basquin 模型中的指数系数与 R 的相关性并不明显.

3.3 试验与计算结果差异分析

图 7 表征了 TA19 母材试件的试验寿命与 Basquin 模型的计算寿命的比较,图中的空心点表示断裂在夹持段的无效数据.其中,对称中线为零误差线,另外两条线为寿命分析常用的 2 倍线,即为 $\pm 100\%$ 误差线.从图 7 可以看出,在重点关注的有限寿命范围(10^4 循环 $< N_f < 10^6$ 循环)内,试验结果基本都在计算结果的 2 倍线以内,个别点偏保守,表明由母材试件的试验结果拟合得到的 S-N 曲线在有限寿命范围内是可信的.

与图 7 类似,图 8 表征了 TA19 焊接试件的试验寿命与模型计算寿命的比较.图 8 表明:试验结果大部分在 2 倍线以内,在 10^4 循环 $< N_f < 10^6$

循环的寿命范围内,有少量点落在了 2 倍线之外,与图 7 中母材试件的结果相比稍差.但是由于数量极小,因此,仍然可以认为由焊接试件试验结果所得的 S-N 曲线在有限寿命范围内是可信的.

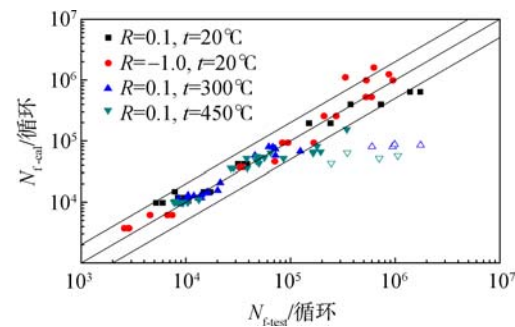


图 8 TA19 焊接试件试验与计算寿命比较
Fig. 8 Comparison of life obtained by test and calculation of TA19 welding specimen

3.4 焊缝材料和母材性能差异分析

表 4 为不同试验条件下不同寿命范围内焊接试件疲劳断口在焊缝处的数量.可以看出,大部分焊接试件断裂在焊缝之外,且疲劳断口在焊缝处的试件个数呈现出一定的规律:在低周($N_f < 10^4$ 循环)寿命区域,较多试件断于焊缝;随着应力的降低、寿命的增加,越来越多的试件断于焊缝之外的其他位置,这表明焊缝材料的高周疲劳性能与母材相差不大.此外,从表 4 中可以看出,断口位置明显还受到应力比 R 的影响.

表 4 焊接试件疲劳断口在焊缝处的数量
Table 4 Welding specimen counts broken in welded joint

试验条件	寿命/循环	试件数/个	有效试件数/个
R=0.1, t=20℃	$< 10^4$	4	6
	$10^4 \sim 10^6$	3	11
	$> 10^6$	0	2
R=-1.0, t=20℃	$< 10^4$	1	6
	$10^4 \sim 10^6$	0	15
	$> 10^6$	0	1
R=0.1, t=300℃	$< 10^4$	2	7
	$10^4 \sim 10^6$	4	15
	$> 10^6$	0	2
R=0.1, t=450℃	$< 10^4$	1	8
	$10^4 \sim 10^6$	5	20
	$> 10^6$	0	2

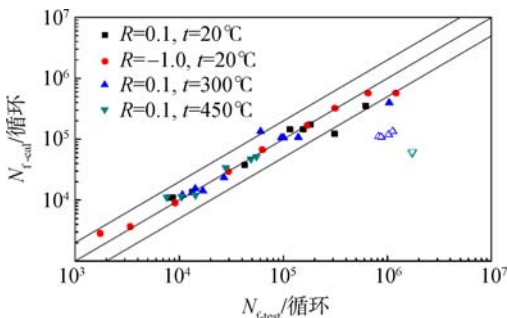


图 7 TA19 母材试件试验与计算寿命比较
Fig. 7 Comparison of life obtained by test and calculation of TA19 BM specimen

图9中汇总了TA19母材试件和焊接试件在相同试验温度和应力比条件下的试验数据和所得S-N曲线的比较.可以看出,不同试验温度下,应

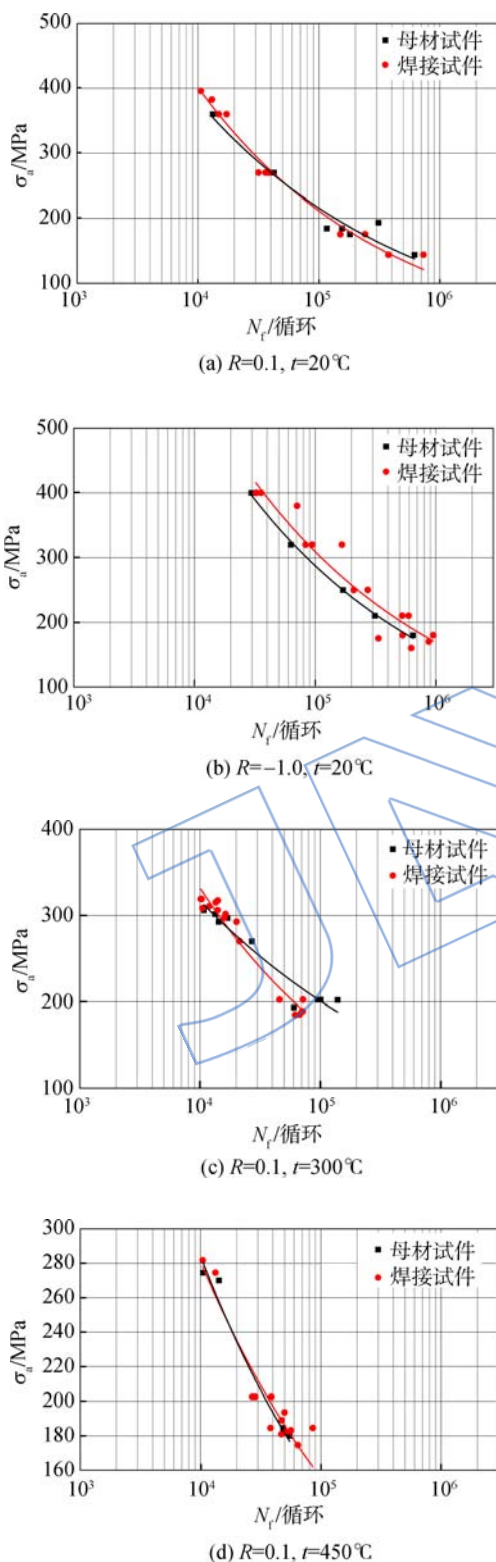


图9 TA19母材试件和焊接试件的S-N曲线比较
Fig. 9 Comparison of S-N curves between TA19 BM specimen and welding specimen

力比 $R=0.1$ 时的母材试件和焊接试件所得的S-N曲线出现交叉,表明在 $R=0.1$ 时,焊接试件与母材试件的疲劳性能在不同寿命区间表现出不同的特性.而在 $R=-1.0$ 时 20°C 下两者的S-N曲线基本是平行的,且焊接试件S-N曲线在母材试件S-N曲线之上,表明这种条件下在有限寿命范围内焊接试件的疲劳性能要优于母材试件.

图10表征了在给定应力的前提下,焊接试件与母材试件的S-N曲线所预测的寿命差异.图中横坐标为应力幅,根据寿命区间(10^4 循环 $< N_f < 10^6$ 循环)的试验结果取值范围在 $100\sim 450\text{ MPa}$;纵坐标为焊接试件寿命 $N_{f,ebw}$ 与母材试件寿命 $N_{f,bm}$ 之差与母材试件寿命的比值,因此纵坐标范围在 $1\sim -1$.在一定的温度和应力比的情况下,可知 $(N_{f,ebw} - N_{f,bm})/N_{f,bm}$ 是应力幅 σ_a 的函数.

从图10中可以看出,室温下的曲线总在纵坐标0值之上,并且比较平缓,表明焊接试件的寿命比母材试件要略高些,并在整个寿命范围与母材试件的性能差异相对稳定;随着温度的升高,图中曲线表现出较大差异,并且不同温度下焊接试件与母材试件寿命的差异随应力水平变化也呈现不同的趋势.在 300°C 时,曲线在高应力区在纵坐标0值之上,而在低应力区,曲线在纵坐标0值之下,这表明低周疲劳条件下焊接试件的寿命较母材试件高,而在高周疲劳条件下焊接试件的寿命明显低于母材试件;在 450°C 时,S-N曲线趋势与 300°C 的S-N曲线刚好相反,表明在高周疲劳条件下,焊接试件疲劳强度提高,并可能超过母材试件;而在低周疲劳条件下焊接试件疲劳强度要弱于母材试件.但总地看来,在所考察的寿命范围(10^4 循环 $< N_f < 10^6$ 循环)对应的应力适用范围内,3条曲线上点的纵坐标都在 $-0.5\sim 0.5$ 之间,

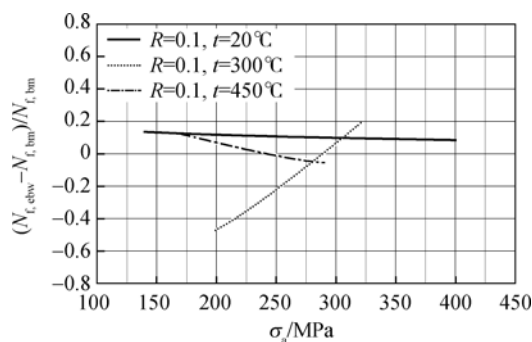


图10 $R=0.1$ 时不同温度下 $(N_{f,ebw} - N_{f,bm})/N_{f,bm} \sim \sigma_a$ 曲线

Fig. 10 $(N_{f,ebw} - N_{f,bm})/N_{f,bm} \sim \sigma_a$ curves with different temperatures and $R=0.1$

表明焊接试件与母材试件的平均寿命差异均在 2 倍线以内。因此,可以认为两种试件的寿命的差异也可能是疲劳模型的正常差异,即电子束焊焊接试件的疲劳性能接近于母材试件。

4 结 论

1) 电子束焊焊缝材料的断口与母材的断口形貌相似,表明两种材料都是由于在循环载荷下产生疲劳而断裂。

2) 电子束焊焊接试件的断口大部分都不在焊缝,表明焊缝材料的疲劳强度可能略高于母材。

3) 在 10^4 循环 $< N_f < 10^6$ 循环的试验寿命区间中,试件的试验结果基本落在本文得到的 S-N 曲线的 2 倍线之间,表明了本文试验所得 S-N 曲线的合理性和准确性。

4) 在 10^4 循环 $< N_f < 10^6$ 循环的试验寿命区间中,相同温度和应力比条件下,电子束焊焊接试件的寿命与母材试件的寿命的差异在 2 倍线以内,可以认为是由于材料数据的分散性造成的,即电子束焊焊接试件的疲劳性能与母材试件接近。

5) 本文试验结果初步表明,在长寿命、高可靠性的民用航空发动机设计中采用 TA19 电子束焊焊接工艺不会对设计造成明显影响。

参考文献:

- [1] ZHANG Jing, TAN Chengwen, REN Yu, et al. Quasi-static and dynamic tensile behaviors in electron beam welded Ti-6Al-4V alloy[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(1): 39-44.
- [2] Suresh D, Mohandas M T. A comparative evaluation of friction and electron beam welds of near- α titanium alloy[J]. Materials and Design, 2010, 31(4): 2245-2252.
- [3] Sun Z, Karppi R. The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals; an overview[J]. Materials Processing Technology, 1996, 59(3): 257-267.
- [4] Suresh N, Pillai M G, Mathew J. Investigations into the effects of electron beam welding on thick Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Materials Processing Technology, 2007, 192/193(1): 83-88.
- [5] Mohandas T, Varma V K, Kutumbarao V V. Low cycle fatigue behaviour of electron beam and friction welded joints of an α - β titanium alloy[J]. Scripta Materialia, 1996, 35(2): 187-192.
- [6] 李晓延, 巩水利, 陈俐. TC4 钛合金薄板高能束焊接接头疲劳性能研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(4): 26-29.
LI Xiaoyan, GONG Shuili, CHEN Li. A study of fatigue life of TC4 titanium alloy sheet and its high density beams welded joints[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(4): 26-29. (in Chinese)
- [7] 齐红宇, 李少林, 杨晓光, 等. 锻造 TC4 钛合金电子束焊接接头的疲劳破坏机制[J]. 航空动力学报, 2013, 28(2): 264-269.
QI Hongyu, LI Shaolin, YANG Xiaoguang, et al. Fatigue fracture mechanical of forged TC4 alloy joints by electron beam welding[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 264-269. (in Chinese)
- [8] 武奇, 邱惠清, 郭海丁. TC11 钛合金焊接接头低周疲劳分形损伤演化研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 730-736.
WU Qi, QIU Huiqing, GUO Haiding. Studying for low-cycle fatigue fractal damage evolution on TC11 Ti alloy welded joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 730-736. (in Chinese)
- [9] 郭海丁, 郭华芝, 刘观日, 等. TC4 钛合金焊接接头疲劳损伤演变模型研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(2): 206-210.
GUO Haiding, WU Huazhi, LIU Guanri, et al. A research of fatigue damage evolution of TC4 alloy welded joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(2): 206-210. (in Chinese)
- [10] 王卫国, 古远兴, 鲁东胜, 等. 电子束焊接整体叶盘结构验证件设计和试验研究[J]. 航空制造技术, 2007(增刊): 422-425.
WANG Weiguo, GU Yuanxing, LU Dongsheng, et al. Design and experimental investigation of blisk research structure with electron beam welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007 (suppl.): 422-425. (in Chinese)
- [11] 刘小刚, 郭海丁, 汪邦中, 等. TC11 焊接接头高周疲劳分形损伤模型[J]. 航空动力学报, 2011, 26(2): 355-361.
LIU Xiaogang, GUO Haiding, WANG Bangzhong, et al. Study on high cycle fatigue fractal damage model of TC11 alloy welded joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(2): 355-361. (in Chinese)
- [12] 罗刚, 范引鹤, 梁尤疆. 高温合金焊接接头应力分析与疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报, 2007, 22(2): 327-331.
LUO Gang, FAN Yinhe, LIANG Youjiang, et al. Stress analysis and fatigue life estimation of four kinds of superalloy welded joints[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(2): 327-331. (in Chinese)
- [13] 吴冰, 刘昕, 唐振云, 等. 大厚度钛合金电子束焊接接头的低周疲劳行为[J]. 航空制造技术, 2007(增刊): 368-370.
WU Bing, LIU Xin, TANG Zhenyun, et al. Low-cycle fatigue performance on the large thickness titanium alloy joints of electron beam welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(suppl.): 368-370. (in Chinese)
- [14] 钟玉, 屈金山, 陈文静, 等. TC4 钛合金的电子束焊[J]. 热加工工艺, 2007, 36(15): 24-26.
ZHONG Yu, QU Jinshan, CHEN Wenjing, et al. Electron beam welding of TC4 alloy[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(15): 24-26. (in Chinese)
- [15] 李行志, 胡树兵, 肖建中, 等. TA15 钛合金电子束焊接接

- 头不同区域的疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 航空材料学报, 2010, 30(1): 52-56.
- LI Xingzhi, HU Shubing, XIAO Jianzhong, et al. Study on fatigue crack propagation in different zones of TA15 electron beam welded joint[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(1): 52-56. (in Chinese)
- [16] 唐振云, 毛智勇, 李晋炜, 等. TC4-DT 合金电子束焊接接头低周疲劳性能研究[J]. 航空制造技术, 2011(16): 111-115.
- TANG Zhenyun, MAO Zhiyong, LI Jinwei, et al. Research on EBW joint low cycle fatigue property of TC4-DT alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(16): 111-115. (in Chinese)
- [17] 许鸿吉, 尹丽香, 李晋炜, 等. TC4 钛合金电子束焊接接头组织和性能[J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 43-46.
- XU Hongji, YIN Lixiang, LI Jinwei, et al. Microstructures and properties of TC4 alloy joints welded by the electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(11): 43-46. (in Chinese)
- [18] 尹丽香, 许鸿吉, 魏志宇, 等. TC4 钛合金电子束焊接接头高温性能与组织[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 49-52.
- YIN Lixiang, XU Hongji, WEI Zhiyu, et al. Microstructures and high-temperature properties of TC4 titanium alloy joints welded by electron beam[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 49-52. (in Chinese)

JALSP