

热变形对 TC4 氩弧拼焊板拉伸与疲劳性能的影响

姚刚¹, 黄锐¹, 李光俊¹, 闫亮亮², 曾庆军², 童国权²

(1. 中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092;
2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 在 700℃下,对 TC4 氩弧拼焊板进行了 3 个变形量(主应变 0.5%、1.6%、2.7%)的等双向拉伸成形,研究了热变形对 TC4 氩弧拼焊板单向拉伸性能和疲劳寿命的影响。结果表明:等双拉变形前后,TC4 氩弧拼焊板拉伸试样均断裂在焊接热影响区,热影响区的强度低于母材和焊缝。随着等双拉热变形量增加,TC4 拼焊板试样疲劳寿命有所增加,这是因为一定变形量的热成形释放了焊接残余应力。

关键词: TC4 氩弧拼焊板; 等双拉变形; 热成形; 疲劳性能

Effects of Hot Forming on Tensile and Fatigue Properties of TC4 TIG Tailor Welded Blank

YAO Gang¹, HUANG Rui¹, LI Guangjun¹, YAN Liangliang², ZENG Qingjun², TONG Guoquan²

(1. Chengdu Aircraft Industries (Group) Corporation, Chengdu 610092, China;
2. CMEE, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Equibiaxial tensile test of TC4 TIG tailor welded blank is carried on three circumstances (principle strain of 5%, 1.6% and 2.7%) at 700℃, and effects of hot forming on tensile and fatigue properties of the blank are investigated. The result shows that during the equibiaxial tensile test, tensile fracture of TIG tailor-welded joints occurs on the heat-affected zone and the strength of the heat-affected zone is lower than that of the base metal and the welding joint. The fatigue property of TC4 TIG tailor-welded joints increases with the deformation of equibiaxial tension. This is due to the release of welding residual stress during hot equibiaxial tension.

Keywords: TC4 TIG tailor welded blank; Equibiaxial tension; Hot forming; Fatigue property

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.18.099

随着飞行器的技术性能向着高空、高速方向发展,对所使用材料的强度、耐热性等要求也越来越高^[1]。传统的铝合金材料往往难以满足新型高速飞行器使用的需要,更多的钛合金板料被应用到飞机结构件以及壁板类零件的制造中来^[2-3]。由于飞机零件特别是机翼等部位的钣金零件尺寸很大,而钛合金板料的轧制宽度有限,因此大型钛合金钣金零件往往需要拼焊。目前航空工业中大型钛合金钣金零件一般是在零件上设计工艺分离面,分别成形钛合金零件的局部,最后利用专用焊接夹具进行焊接得到整个零部件^[4]。但焊接变形和残余内应力将会影响零件质量和使用寿命。如果将原始钛合金板料进行拼焊,采用通用焊接夹具就可以得到大型零部件要求的毛坯尺寸,再进行整体成形,不仅可以降低制造成本、缩短制造周期,而且可以提高零部件制造精度和制造质量。钛合金板料,特别是 TC4,室温成形性能很差,一般需要热成形或者超塑成形。以前,由于热成形机床尺寸的限制,这种方法难以应用。而目前

各航空企业相继购置了大台面热成形机床,已经具备了成形大型零件的条件。航空零件的要求非常严格,拼焊板零件不仅要能够成形,而且必须确保成形后焊缝的性能满足要求,确保热成形后的钛合金零件能够达到航空工业标准。不少学者分别对激光焊接、电子束焊接的 TC4 钛合金板料进行了拉伸与疲劳试验^[5-8],但拼焊板热变形之后材料的性能研究目前尚未见报道。本文利用氩弧焊拼焊了 TC4 板料,研究了热等双拉变形后 TC4 拼焊板的拉伸与疲劳性能。

1 试验条件

1.1 试验材料

本研究采用厚度为 1.5mm 的钛合金 TC4-M 薄板,化学成分如表 1 所示。对 TC4 钛合金进行 TIG 焊接,焊丝采用与母材相同的 TC4 材料,焊接过程按照航空工业标准 HB/Z120-87 进行。拼焊之后的板料首先在显微镜下进行焊缝检查,保证无气孔裂纹等缺陷,然后进行

表1 TC4钛合金化学成分(质量分数) %

Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
6.16	3.51	0.04	0.02	0.014	0.0041	0.0048	0.015	余量

荧光渗透检验,保证焊缝符合航空工业标准一级焊缝要求。试验前将焊缝打磨平整,确保焊缝与母材厚度一致。

1.2 拼焊板热成形

采用图1所示的模具进行(准)等双拉成形,在凸模上由外向内设置A、B、C三道拉延筋,拉延筋用GH2132单独制造,可以拆卸调换。板料在不同高度的拉延筋的压制下可以得到不同的变形量。在模具温度700℃下,放入TC4 TIG拼焊板毛坯并保温3min,压制成形,保温保压15min后取件出模。预先确定TC4板材的主应变 ϵ_1 ,通过有限元分析获得拉延筋高度并制造模具。最后,根据成形试验结果得到拉延筋高度与主应变的关系如表2所示。实际制造的等双向拉伸模具如图2所示。

通过对成形后的板料底部的应变值进行测量计算,结果显示,板料底部焊缝两侧100mm范围内变形接

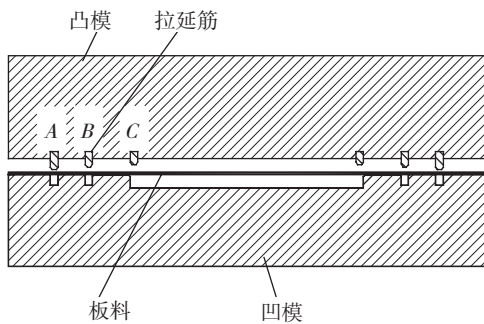


图1 热成形用模具示意图

Fig.1 Schematic diagram of hot forming die

表2 拉延筋高度设计

应变设计	拉延筋的高度/mm		
	A筋	B筋	C筋
$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.5\%$	16	14	0
$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1.6\%$	16	14	12
$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2.7\%$	16	14	14



图2 等双向拉伸模具

Fig.2 Photo of equibiaxial tensile die

近等双向拉伸变形,且变形均匀。成形后的钛合金板料经过碱崩去除表面的氧化皮,最后得到的实物如图3所示。

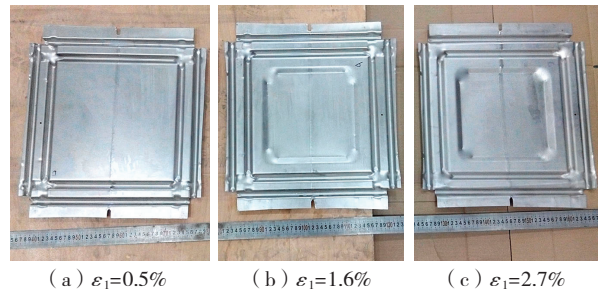


图3 热变形后的氩弧拼焊板

Fig.3 TIG tailor welded blank after hot equibiaxial tension

1.3 拉伸与疲劳试验

从未成形和等双拉变形后的拼焊板上切割拉伸和疲劳试样,保证焊缝位于试样中间位置,其尺寸(mm)和形状如图4所示。

对所用TC4板料母材,拼焊板以及3个变形量后的拼焊板分别在室温下进行了拉伸试验。单向拉伸试验按照GB/T 228-87《金属拉伸试验方法》进行,疲劳试验按照GB/T 305-1982《金属轴向疲劳试验方法》进行。疲劳载荷为三角波循环载荷,应力比 $R=0.1$,最大应力水平分别为母材静载强度的65%、75%和85%,试验频率为88Hz。

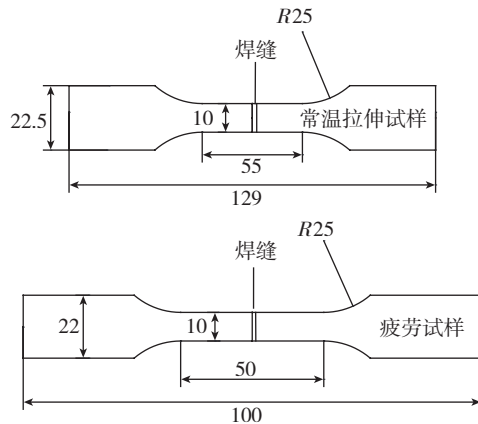


图4 拉伸和疲劳试样

Fig.4 Tensile and fatigue samples

2 试验结果与讨论

2.1 拉伸性能

TC4母材和拼焊板(准)等双拉前后焊接接头的拉伸试验数据如图5所示。由图可知:室温下,TIG拼焊板试样的抗拉强度和屈服强度均略低于母材。这是由于焊接热影响区强度减弱所造成的。所有拉伸试样的

断裂位置均位于焊缝两侧的热影响区,证明了热影响区强度低于母材和焊缝。图 5 还表明,经过热变形的拼焊板试样抗拉强度和屈服强度又均略低于未变形拼焊板。这是由于热变形过程中,在拉伸应力和成形温度的双重作用下,降低了焊接内应力,导致热变形焊接接头强度比未变形拼焊板有所降低。

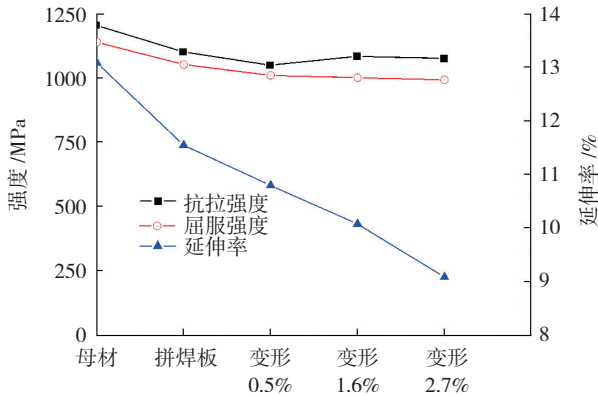


图5 等双拉变形对TC4 TIG拼焊板拉伸性能的影响
Fig.5 Influence of equibiaxial tensile deformation on tensile performance of TC4 TIG tailor welded blank

拼焊板延伸率下降的趋势较抗拉强度和屈服强度更为明显。热等双拉变形量越大, TC4 TIG 拼焊板的延伸率越低。未变形拼焊板试样的延伸率约为母材的 86%,而经过 $\epsilon_1=2.7\%$ 等双拉变形的拼焊板试样其延伸率仅为母材的 70%。在拉伸试验过程中,热影响区相对于焊缝和母材塑性是弱区,变形基本局限于热影响区,表现为 TC4 TIG 拼焊板的塑性明显低于母材。但是,经过 $\epsilon_1=1.6\%$ 热等双拉变形的拼焊板试样,其延伸率大于 10%,说明热变形后的 TC4 TIG 拼焊板仍然具有比较好的塑性。

2.2 疲劳寿命统计分析

对疲劳试验结果采用式(1)进行统计分析,用最小二乘法回归计算 $S-N$ 曲线中指数 m 和常数 C 的值^[9]。

$$m \lg \Delta \sigma + \lg N = \lg C \quad (1)$$

回归计算结果如表 3 所示,并以此绘出了母材和(准)等双拉变形前后拼焊板接头的 $S-N$ 曲线,如图 6

表3 指数 m 和常数 C 的回归计算结果

样本	m	C
母材	10.38	1.12×10^{35}
未变形拼焊板	3.56	3.20×10^{14}
(准)等双拉 $\epsilon_1=0.5\%$	4.86	1.86×10^{18}
(准)等双拉 $\epsilon_1=1.6\%$	3.74	1.24×10^{15}
(准)等双拉 $\epsilon_1=2.7\%$	6.22	2.53×10^{22}

所示。

由表 3 和图 6 可知,拼焊板接头的疲劳寿命在每个试验应力水平下均低于母材,(准)等双拉后拼焊板接头疲劳寿命高于未变形拼焊板。其原因可能是:疲劳寿命包含裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命,由于 TIG 拼焊板接头显著的非均质性,某些局部区域应变集中严重,过早产生塑性变形进而发展成为疲劳微裂纹,裂纹萌生寿命降低,致使拼焊板疲劳寿命低于母材。而(准)等双拉变形后的拼焊板由于经过热成形,这对于焊缝处相当于去应力退火处理,所以(准)等双拉变形后的拼焊板疲劳性能要优于未变形的拼焊板。

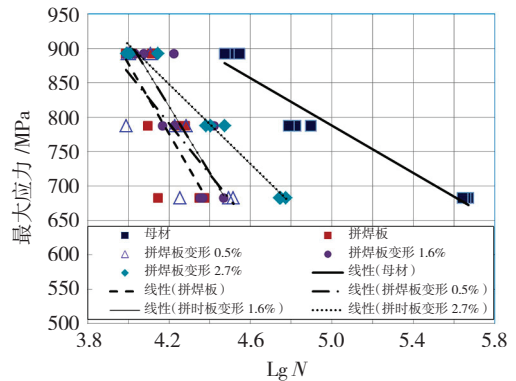


图6 TC4母材与(准)等双拉变形前后拼焊板接头的 $S-N$ 曲线
Fig.6 $S-N$ curves of TC4 base metal and TIG tailor welded joints

对于大型钛合金钣金零件,如果采用先成形再拼焊工艺路线,由于拼焊后的成形零部件不可能进行去应力退火,否则将产生翘曲变形导致钣金零件报废。因此,就保证大型 TC4 钣金零件的疲劳性能和降低制造成本而言,先焊接然后再进行热成形的工艺路线具有明显的优势。

3 结论

(1) TC4 TIG 拼焊板热影响区的强度在热等双拉变形前后均低于母材和焊缝。热等双拉后, TC4 TIG 拼焊板的强度略有下降、延伸率下降明显。

(2) 在各试验应力水平下, TC4 TIG 拼焊板接头的疲劳寿命均低于母材。热等双拉变形后,拼焊板的疲劳寿命较未变形拼焊板有较大提高。

(3) 热等双拉变形后, TIG TC4 拼焊板的室温强度和延伸率降低较小,而疲劳强度有所增加。这表明先拼焊再热成形的工艺路线具有一定的优势。

参考文献

[1] 李重河,宋明,王宁. 钛合金在飞机上的应用[J]. 稀有金属, 2009,33(1): 84-91.

(下转第108页)