

TA15 钛合金线性摩擦焊在飞机结构上的应用研究

Application Study on Linear-friction Welding of TA15 Titanium Alloy Applied to Aircraft Structure

中航工业沈阳飞机设计研究所 许平 毕世权 苏智星 都泽鑫

[摘要] 针对 TA15 钛合金的线性摩擦焊开展了焊后热处理制度优化研究,在确定的热处理制度下测试了线性摩擦焊接头的力学性能,开展了具有典型结构特征的四点弯曲梁的静力/疲劳试验研究。研究表明:TA15 钛合金线性摩擦焊接头的静强度、疲劳性能和断裂韧性等均较好,可以用于飞机结构件的焊接。

关键词: TA15 钛合金 线性摩擦焊 焊后热处理 力学性能 四点弯曲梁 主承力结构

[ABSTRACT] Aimed for linear-friction welding of TA15 titanium alloy, post-welding heat treatment is studied, and mechanical property is tested based on the specified post-welding heat treatment, furthermore, the test of static force/fatigue for four point bending beam is studied. The results show that the static strength, fatigue property and fracture toughness are excellent, linear-friction welding can be applied to aircraft structure.

Keywords: TA15 titanium alloy Linear-friction welding Post-welding heat treatment Mechanical property Four point bending beam Main load-carrying structure

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.069

线性摩擦焊技术是待焊工件之一固定,另一工件以一定速度作往复运动,或两个工件作相对往复高频运动,在垂直于往复运动方向的压力作用下随摩擦运动进行,摩擦表面被清理并产生摩擦热,摩擦表面的金属逐渐达到粘塑性状态并产生变形,进而被挤出界面形成飞边,随后停止往复运动并施加顶锻力,完成焊接^[1]。该方法在 20 世纪 80 年代中期进入燃气轮机行业,拟用作整体叶盘更换损伤叶片的修理工艺^[2],与常规焊接技术相比,线性摩擦焊过程属于固态连接,金属不熔化、不变形,而且不管工件截面是否对称,均可以进行焊接。线性摩擦焊除了焊接钛合金、高强度钢材料,还可以焊接难以熔焊的粉末冶金材料、金属间化合物和金属基复合材料,并且可进行异种金属的焊接,焊缝的静动态力学性能甚至超过母材。

线性摩擦焊主要用于飞机发动机涡轮盘与叶片的

焊接,还可用于焊接大截面的塑料部件,已经成为叶盘、叶环结构的主导工艺之一,但线性摩擦焊在飞机结构上的应用却较少。为了推广该技术在飞机上的应用,针对飞机结构常用的 TA15 钛合金材料,开展线性摩擦焊焊接接头热处理优化制度、全面力学性能研究、典型结构件的静力、疲劳试验研究并对其进行评价,为线性摩擦焊技术在飞机结构件上的应用奠定基础。

TA15 钛合金是综合性能优异的钛合金材料,它的名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V,主要的强化机制是通过 α 稳定元素 Al 的固溶强化,加入中性元素 Zr 和 β 稳定元素 Mo 和 V,以改善其工艺性。该合金的 Al 当量为 6.58%, Mo 当量为 2.46%,属于高 Al 当量的近 α 型钛合金,它既具有 α 型钛合金良好的热强性和可焊性,又具有接近于 $\alpha-\beta$ 型钛合金的工艺塑性。TA15 钛合金长时间(3000h)工作温度可达 500℃,瞬时(不超过 5min)可达 800℃^[3]。概括来说,TA15 合金具有中等室温和高温强度、良好的热稳定性和焊接性能,工艺塑性稍低于 TC4,强度等级在 $\sigma_b \geq 930\text{MPa}$ 的中等强度钛合金,综合性能优良。

TA15 钛合金的锻件或厚板广泛应用于国内第三代飞机的框梁等主承力结构上,由于主承力结构的尺寸通常偏大,往往需要结合焊接工艺以小拼大,以提高零件的整体性和结构效率。以往飞机主承力结构通常选用氩弧焊、电子束焊等焊接技术,随着线性摩擦焊技术的发展以及国内线性摩擦焊设备能力的提升,目前国内可焊接截面积为最大为 6000mm² 的接头,将其应用飞机的主承力结构上已经成为可能。

1 TA15 钛合金线性摩擦焊热处理制度优化研究

由于焊接为局部加热,在操作过程中会产生复杂的热应力,如果焊后不进行有效的工艺处理,将会产生残余应力和变形,甚至在没有外界因素作用下,结构自身也会产生开裂或变形^[4]。因此焊后需进行有效的、温度适宜的热处理,以去除焊接的残余应力和变形,并可适当提高焊缝韧性,获得综合性能优异的焊接接头。

为获得综合性能良好的线性摩擦焊接头制备了一

批试验件,焊后采用不同的温度对接头进行热处理,热处理温度分别选取了 600℃、650℃、700℃、750℃、800℃、850℃共 6 个温度点,保温 3 小时,分析了其不同热处理制度下焊缝微观组织,同时进行了拉伸、冲击、疲劳和断裂韧性等力学性能的测试。

从测试结果上比较,各个热处理温度下的室温拉伸性能基本相当,抗拉强度在 930~984MPa 之间,屈服强度在 826~933MPa 之间;V 型缺口的夏比摆锤冲击试验,随着热处理温度的升高,其冲击吸收功逐渐升高,热处理制度为 850℃时,冲击吸收功平均值最高,达 41.364J;各个热处理制度下的疲劳强度极限在 378.6 ~ 533.9MPa 之间,其中热处理制度为 650℃时接头的高周疲劳强度最高,可达 533.9MPa;对于断裂韧性,在 800℃之前,随着热处理温度的升高,性能变得更好,热处理温度为 800℃时,接头的抗断裂能力最好,裂纹尖端张开位移 C_{TOD} 为 0.044mm,但热处理温度为 850℃时,热影响区断裂韧性略有下降。因而,如果想获得良好的冲击性能和断裂韧性,可以选择温度较高的热处理制度,如 800℃;如果需要较好高周疲劳强度,可以选择温度较低的热处理制度,如 650℃。

2 TA15 钛合金线性摩擦焊全面力学性能

为考核 TA15 钛合金线性摩擦焊接头的全面力学性能,选择热处理温度为 750℃,保温 3 小时,测试了 TA15 钛合金母材和线性摩擦焊接头的拉伸、冲击、低周疲劳、高周疲劳、断裂韧性、应力腐蚀开裂、疲劳裂纹扩展速率等性能并进行对比分析,以便对线性摩擦焊接头的性能进行评价。

2.1 拉伸性能

室温拉伸性能试验按 HB5143 进行,试验温度为 23℃;低温拉伸性能试验按 GB/T 13239,试验温度为 -60℃;高温拉伸性能试验按 HB5195 进行,试验温度为 200℃;图 1 显示了在不同温度下 TA15 钛合金母材及线性摩擦焊接头的抗拉强度 R_m 和屈服强度 $R_p0.2$ 。可

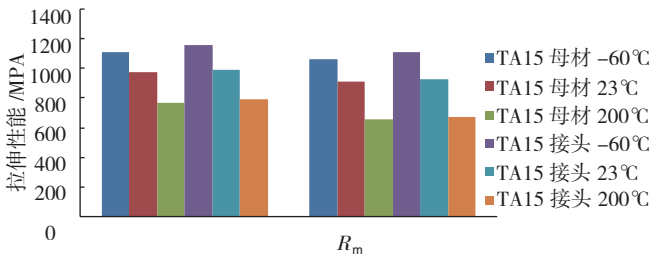


图1 不同温度下TA15钛合金母材及线性摩擦焊接头的抗拉强度 R_m 和屈服强度 $R_p0.2$
Fig.1 Tensile strength(R_m) and Yield strength($R_p0.2$) of TA15 titanium alloy base metal and linear-friction welding joint at different temperatures

见在各个温度下 TA15 线性摩擦焊接头的抗拉强度 R_m 、屈服强度 $R_p0.2$ 与 TA15 母材相当甚至略高。

2.2 冲击性能

冲击性能试样采用 V 形缺口,室温冲击性能试验按 HB5144 进行,试验温度 23℃;低温冲击性能试验按 HB5278 进行,试验温度 -60℃,分别测试了焊缝界面区和焊缝热影响区的冲击性能,每组试样各 8 件,结果取平均值,并与 TA15 母材的冲击性能进行了对比,见图 2。

-60℃时,TA15 母材和接头的冲击吸收功值相差不大,接头焊缝界面区的冲击性能略高;室温条件下,TA15 母材的冲击性能略高于接头,接头焊缝区和热影响区的冲击性能相差不大,二者皆可达到母材的 84%。

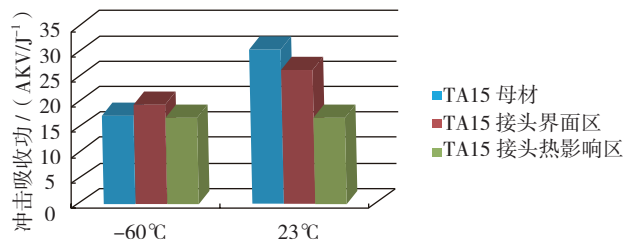


图2 低温与室温冲击性能测试结果
Fig.2 Test results of impact properties at low temperature and room temperature

2.3 平面应变断裂韧性

平面应变断裂韧性 K_{Ic} 试验按 HB5142 进行,试样按紧凑型试样 $B=20$ 、 $W=40$ 选取,分别测试了焊缝界面区和焊缝热影响区,每组试样各 8 件,结果取平均值,并与 TA15 母材的断裂韧性进行了对比,见图 3。

根据图 3 显示,TA15 母材断裂韧性较接头略高,线性摩擦焊接头界面区和热影响区的断裂韧性值略低一些,大约为母材的 80%。

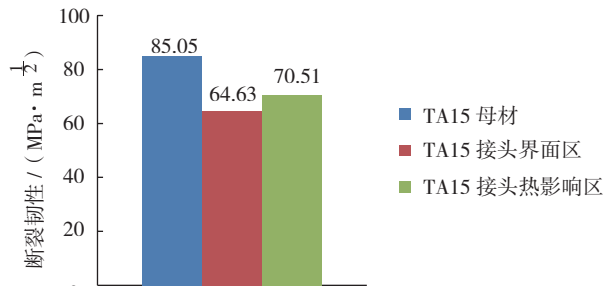


图3 平面应变断裂韧性测试结果
Fig.3 Test results of plane strain fracture toughness

2.4 应力腐蚀性能

应力腐蚀性能 K_{ISCC} 试验按 GB15970.6 进行,试样按紧凑型试样 $B=20$ 、 $W=40$ 选取,与平面应变断裂韧性试样同一尺寸,试验温度为室温,腐蚀溶液为 3.5% (质量分数) 的 NaCl 溶液,分别测试了焊缝界面区和焊缝热

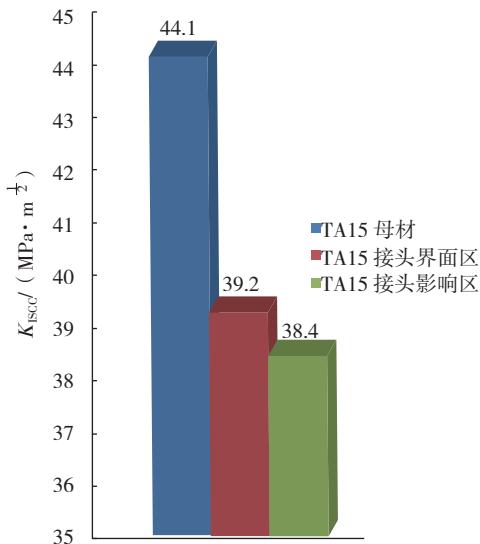


图4 应力腐蚀性能KISCC测试结果
Fig.4 Test results of stress corrosion behavior(K_{ISCC})

影响区,每组试样各 12 件,结果取平均值,并与 TA15 母材的断裂韧性进行了对比,见图 4。

根据图 4 显示,TA15 母材的应力腐蚀 K_{ISCC} 值最高,焊缝界面区和焊缝热影响区的应力腐蚀 K_{ISCC} 值都略有降低,达到母材的 87%。

2.5 疲劳裂纹扩展速率

裂纹扩展速率试验按 GB/T6398,在室温条件下进行,应力比 $R=0.06$,试件为 100×20 块状试样,采用 Paris 公式拟合出焊缝界面区、焊缝热影响区处的 $da/dn-\Delta K$ 曲线,并与母材进行了对比,见图 5。

从图 5 中可以看出,焊缝界面区与焊缝热影响区的裂纹扩展速率几乎与母材相当,在 $\text{Log}(\Delta K) < 1.3$ 时,焊缝界面区 $>$ 母材 $>$ 焊缝热影响区; $\text{Log}(\Delta K) > 1.3$ 时,母材与焊缝热影响区相当,且略高于焊缝。

2.6 轴向加载疲劳

轴向加载疲劳试验按 HB5287 进行,试件分为 $K_t=1$ 光滑疲劳试样和 $K_t=3$ 缺口疲劳试样 2 种,试样数为 35 件 / 组,采用升降法,应力比为 $R=0.06$,其中光滑疲劳

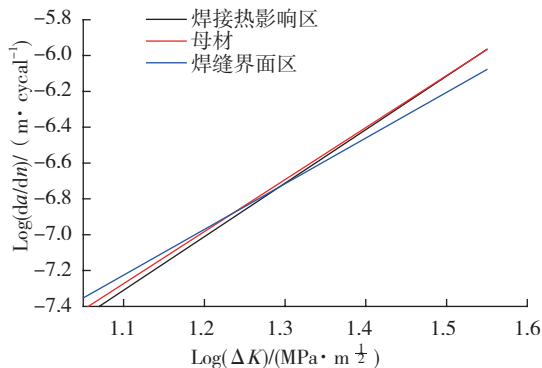


图5 采用Paris公式拟合的 $da/dn-\Delta K$ 曲线
Fig.5 $da/dn-\Delta K$ curve fitted by Paris formula

$K_t=1$ 试件采用直径 7mm 中间有 24mm 的平直段试样,缺口疲劳 $K_t=3$ 试样采用直径 7.5mm 的试样。根据试验结果得出,光滑疲劳试样的强度极限为 409MPa, $K_t=3$ 缺口疲劳试样的强度极限为 401MPa。而 TA15 钛合金锻件母材的 $K_t=1$ 光滑疲劳和 $K_t=3$ 缺口疲劳的疲劳极限分别为 423MPa^[3] 和 226MPa,由此可见线性摩擦焊接头的轴向加载疲劳寿命非常好。

2.7 横应变低周疲劳性能

恒应变低周疲劳性能试验按 GB/T15248 在室温下进行,应力比 $R=0.1$,试验波形为三角波,试件数为 25 件。根据试验结果拟合出 $\Delta \varepsilon/2-2N_f$ 曲线,并与母材进行了对比,如图 6 所示。应变幅在 0.5 以下时,接头与母材的低周疲劳性能相当,当应变幅大于 0.5 时,低周

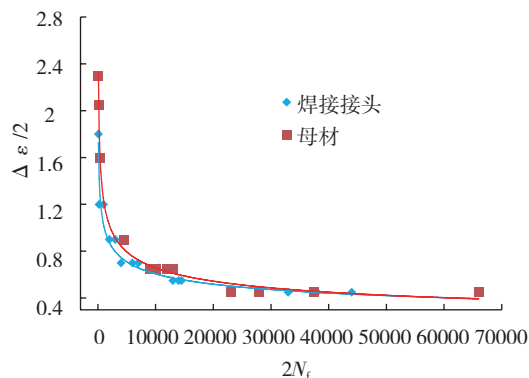


图6 TA15钛合金线性摩擦焊接头恒应变低周疲劳曲线
Fig.6 Constant strain low cycle fatigue curve of linear-friction welded joint made of TA15 titanium alloy

疲劳寿命略低于母材。

从上述线性摩擦焊的性能数据可见,TA15 钛合金线性摩擦焊接头具有较好的综合性能,其中拉伸性能、冲击性能、疲劳裂纹扩展速率、轴向加载疲劳及与横应变低周疲劳性能等都与母材基本相当,平面应变断裂韧度和应力腐蚀性能略低于母材,达到母材的 80% 左右。

3 线性摩擦焊典型结构件的静力 / 疲劳试验研究

根据线性摩擦焊的特点,该技术可用于主承力框架的连接,这些连接部位一般采用工字型、T 字型或 Π 字型截面,因而开展了工型截面线性摩擦焊四点弯曲梁的静力 / 疲劳性能研究,四点弯曲梁的对称面处采用线性摩擦焊连接,见图 7。四点弯曲梁的支持加载方案见图 8,外侧两个支持点,中间两个加载点,两个加载点中间为等弯矩区,不考虑焊缝修正系数的理论静力破坏载荷为 115.08kN。

3.1 静力试验

选取 2 件四点弯曲梁进行静力试验,实际破坏载荷

分别为 128.89 kN 和 128.04 kN,较理论破坏载荷高出约 10%,破坏于线性摩擦焊附件的等弯距区域,这说明线性摩擦焊接头的静强度略高于母材。

3.2 疲劳试验

疲劳试验分 3 个阶段进行,前两个阶段采用二级等幅谱加载,分别完成 94500 次相当于 3000 飞行小时的疲劳寿命试验,其中第二阶段载荷谱为第一阶段原谱的 1.2 倍,第三阶段采用等幅谱加载,应力比 $R=0.1$,载荷峰值取静力破坏载荷平均值的一半,做至试验件破坏或 94500 次。

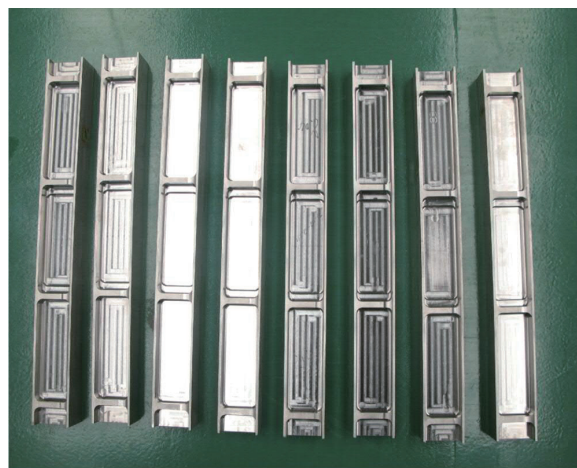


图7 线性摩擦焊四点弯曲梁

Fig.7 Linear-friction welded four point bending beam

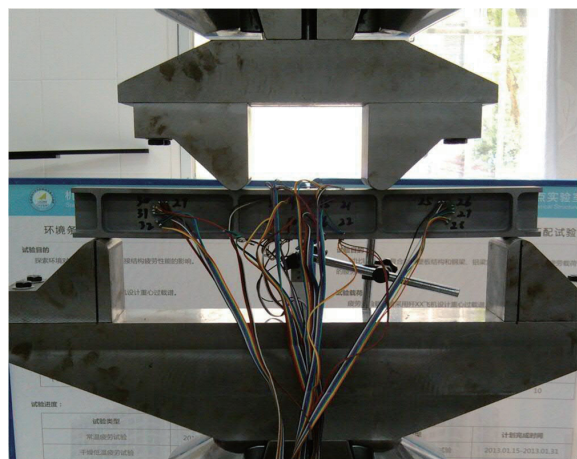


图8 四点弯曲梁的支持加载方案

Fig.8 Support and loading scheme of four point bending beam

四点弯曲梁疲劳试验结果见表 1,目前完成 4 件疲劳试验,全部完成上述三个阶段的疲劳寿命试验,试件并未发生破坏。这表明在特定的应力水平下,四点弯曲梁疲劳寿命已远高于 9000 飞行小时,线性摩擦焊接头具有较好的疲劳特性,能够满足飞机结构上主承力框梁的设计需求。

4 采用线性摩擦焊的结构特点分析

图 9 为左、右两侧采用 TA15 钛合金,中间接头采用 TC17 钛合金的结构样件,线性摩擦焊为实现异种金属材料之间的焊接提供了可能。根据资料报道,异种钛合金材料之间进行线性摩擦焊,其接头的拉伸强度介于两种母材之间,略高于低强度的母材,高周疲劳性能可达到较低强度母材的 95% 以上^[5],这种结构的接头区需要强度较高的材料,而其余部分采用中等或较低强度的材料即可,这项技术对于根据结构特征充分发挥材料的性能和实现结构的减重意义重大。

线性摩擦焊技术还可以用于飞机主承力框梁上接头连接、局部突出缘条连接以及纵、横构件交叉处连接,见图 10。由于在空气中完成焊接,线性摩擦焊不受真空室尺寸及焊缝方向的限制,对于焊接特定形状的零件,其自由度更大,更易于实现。线性摩擦焊技术和搅

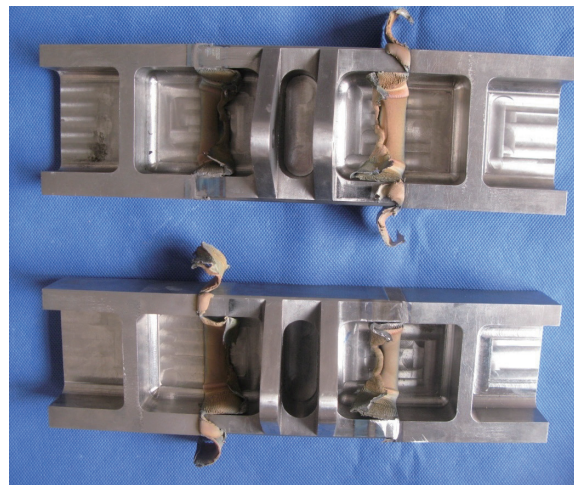


图9 异种钛合金焊接的线性摩擦焊接头

Fig.9 Linear-friction welded joint made of different titanium alloys

(下转第 78 页)

表1 TA15线性摩擦焊四点弯曲梁疲劳试验结果

试验件	疲劳试验一阶段	疲劳试验二阶段	疲劳试验三阶段	试验件破坏情况
1	完成 94500 次循环,相当于 3000 小时疲劳寿命	完成 94500 次循环, ≥ 3000 小时疲劳寿命	完成 94500 次循环, ≥ 3000 小时疲劳寿命	未破坏
2				
3				
4				

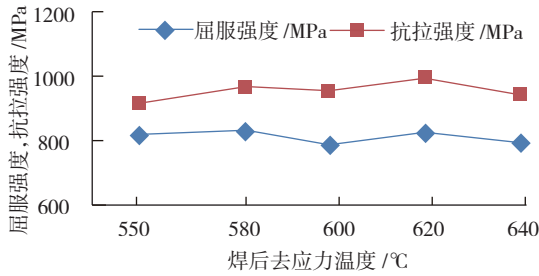


图3 400℃拉伸强度

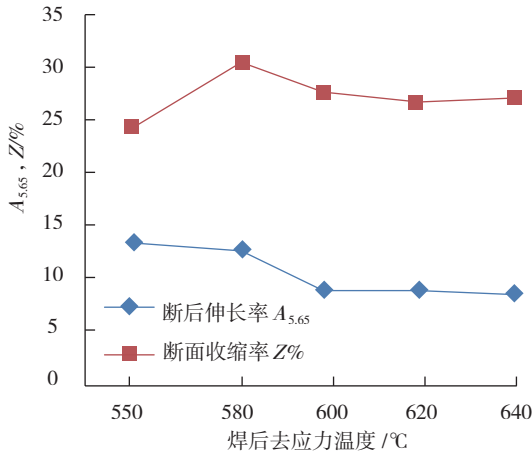


图4 400℃拉伸塑性

表5 接头的400℃拉伸测试数据 (平均值)

去应力温度 / °C		550	580	600	620	640	母材 / 时效 625 °C
强度	屈服强度 / MPa	816.6	828.3	786.6	823.3	793.3	859.6
	抗拉强度 / MPa	916.6	966.6	956.6	991.6	941.6	949
塑性	断后伸长率 $A_{5.65}$ / %	13.5	12.83	9.0	9.0	8.67	10
	断面收缩率 Z / %	24.37	30.5	27.67	26.83	27.17	21.8

表6 接头的室温冲击数据 (平均值 K_{U2} / J)

温度 / °C	550	580	600	620	640	母材
冲击吸收功	4.34	4.43	5.67	6.67	7	23

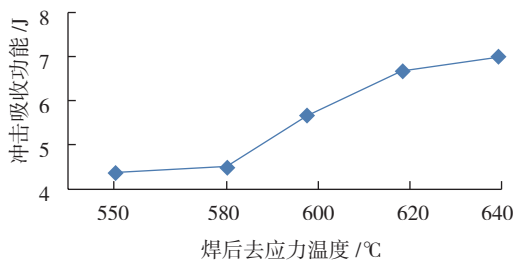


图5 室温冲击吸收功

图5 Impact ductility of samples in room temperature

6 试验结论

(1) TC17 在时效态下电子束焊接性能较好, 室温、400℃下的强度塑性与母材相当, 但冲击韧性较差; 620℃相比较其它热处理温度是较为理想的焊后热处理温度, 其强度、塑性、韧性等综合力学性能较好。

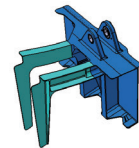
(2) TC17 在时效态下电子束焊接后进行 620℃的去应力热处理, 尽管冲击韧性较好, 也仅为母材的 30% 左右。

(3) 由于接头在焊后 600℃热处理其室温、400℃下的强度、塑性出现异常, 需进一步研究焊后 600℃热处理对其力学性能的影响原因。

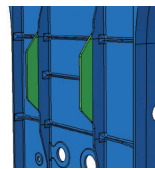
参考文献

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会 中国航空材料手册第 2 版. 钛合金铜合金(第 4 卷), 2002.
- [2] 季亚娟, 张田仓, 李晓红, 等. TC11/TC17 钛合金线性摩擦焊接接头组织与性能. 航空制造技术, 2001(8):66-69. (责编 古京)

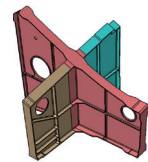
(上接第 72 页)



(a) 主承力框架上接头的连接



(b) 局部突出缘条的连接



(c) 纵横构件交叉连接

图10 拟采用线性摩擦焊的飞机结构件

图10 Linear-friction welded aircraft structure in the future

拌摩擦焊技术、电子束焊接技术等互为补充, 取长补短, 为实现飞机设计师的设计理念提供了更有效的途径。

参考文献

- [1] 张柯柯, 涂益民. 特种先进连接方法. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2008.
- [2] 汪亚卫. 国防科技名词大典(综合卷). 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [3] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册. 第 2 版, 第 4 卷. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [4] 王向明, 刘文斑, 等. 飞机钛合金结构设计与应用. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [5] 刘颖, 张田仓, 李晶, 等. TC4/TC17 钛合金线性摩擦焊接接头性能分析. 航空材料学报, 2011(31):112-117. (责编 古京)