

# 钛合金夹层结构扩散钎焊工艺研究

赵鼎<sup>1</sup>, 刘琳<sup>2</sup>, 孙龙飞<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072; 2. 西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘要:**利用 Dictra 动力学软件对中间层 Cu 元素在 TC4 钛合金扩散钎焊界面附近的浓度分布规律进行了模拟研究, 获得了中间层厚度、连接温度和保温时间对界面元素扩散距离的影响趋势, 结合夹层结构零件的焊接试验, 验证了扩散模拟计算的正确性。结果表明, 连接温度对钛合金夹层结构扩散钎焊的接头强度影响最大, 其次为保温时间, 中间层厚度对接头强度无显著影响。针对钛合金夹层结构零件, 结合焊缝微观组织分析可知, 较优的扩散钎焊工艺参数应为: 连接温度 940 °C, 保温时间 50 min, 中间层厚度为 20 μm, 达到了产品的使用要求。

**关键词:**钛合金 TC4; 夹层结构; 数值模拟; 扩散钎焊

**中图分类号:**V463-34 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2018)01-0067-08

## Study on diffusion brazing process for titanium alloy sandwich structure

ZHAO Ding<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>2</sup>, SUN Longfei<sup>2</sup>

(1. Department of Aerospace, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The Cu interlayer concentration distribution law near TC4 titanium alloy diffusion brazing interface was simulated by using dynamic software Dictra. The influence trend of the interlayer thickness, bonding temperature and temperature holding time on the diffusion distance of interlayer was obtained, which provided a theoretical basis for the design of process parameters. The correctness of the diffusion analog computation was verified in combination with welding experiment of sandwich structure parts. The results show that the bonding temperature has the greatest influence on the joint strength of titanium alloy sandwich structure diffusion brazing, and then the holding time follows but the interlayer thickness has no influence on the joint strength. For the titanium sandwich structure, the microstructure analysis result of welded joints reveals that the appropriate process of the diffusion brazing should be bonding temperature of 940 °C, holding time of 50 min and the interlayer thickness of 20 μm, which meets the requirements of product.

**Keywords:** TC4 titanium alloy; sandwich structure; numeral simulation; diffusion brazing

## 0 引言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性、综合性能优越等特点,使其在核工业、航空航天、船舶、医学等领域应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。钛元素化学性质非常活泼,钛与大多数金属均形成脆性金属间化合物,其钎焊接头具有难以克服的脆性且强度不高,固相扩散连接有加压条件要求,限制了其在复杂结构上的应用。而扩散钎焊综合了钎焊和固相扩散连接的优点,以其独特的优势,占据着钛合金焊接的重要地位。随着钛合金在航天产品复杂构件中的应用,如新型层板式喷注器结构、蜂窝及波纹板夹层结构和骨架蒙皮结构等金属隔热及承力结构等<sup>[2]</sup>,扩散钎焊工艺技术必定成为一种高效的连接方式得到广泛的推广。

目前,国内外大部分钛合金扩散连接研究<sup>[3~6]</sup>均采用棒状或板状零件进行,接头形式为对接或搭接形式,结构简单,易于实现机械加压。但对于夹层结构零件的扩散连接工艺研究较小,且夹层结构限制了机械加压的应用,不利于零件的贴合,无法形成可靠的接头质量,因此有必要开展夹层结构零件的扩散钎焊工艺研究,摸索合适的焊接工艺参数,提高接头强度。

采用 DICTRA 动力学模拟计算软件,以 TC4 钛合金为研究对象,基于正交试验方法,模拟不同的工艺参数下(中间层厚度、连接温度、保温时间)的中间层元素浓度在钛合金连接界面的互扩散规律,确定不同的工艺参数对中间层元素扩散距离的影响程度,同时结合钛合金夹层结构零件的焊接试验和焊缝组织金相分析,判定模拟计算的可行性与可预测性,为钛合金夹层结构扩散钎焊工艺参数的制定和优化提供依据,缩短研制周期,节约试验成本。

## 1 模拟方法及模型建立

DICTRA 软件是一种模拟多元系统中扩散控制相转变的软件包,该程序基于材料不同区域内多元扩散方程的数值解,求得不同温度、时间、压力下的元素浓度分布。其主要原理<sup>[7-8]</sup>如下:

$$\tilde{J}_k = - \sum_{j=1}^n D_{kj}^n \frac{\partial C_j}{\partial x} = - \sum_{j=1}^n C_k M_k \frac{\partial \mu_k}{\partial C_j} \frac{\partial C_j}{\partial x} \quad (1)$$

$$J_k = \tilde{J}_k - C_k \sum_{i=1}^n J_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + \frac{\partial J_k}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

式中:  $\tilde{J}_k$  为组元  $k$  在点阵坐标系中的秉性扩散流量;  $D_{kj}^n$  为组元  $k$  秉性扩散流量有关的一组秉性扩散系数;  $C_k$  为组元  $k$  的摩尔分数浓度;  $\mu_k$  为组元  $k$  的化学势;  $M_k$  为组元  $k$  的迁移率;  $\frac{\partial \mu_k}{\partial C_j}$  为  $j$  组元摩尔分数浓度对组元  $k$  化学势的影响率;  $J_k$  为组元  $k$  在试验坐标系中的互扩散流量。在实际模拟计算过程中,通过调用 Thermo-calc 中热力学参数和自身 MOB 动力学数据库中的迁移率,就可以模拟多组元合金的元素扩散过程。

模拟对象为 TC4 钛合金,中间层选用 Cu<sup>[9]</sup>,本文研究的是同种材料的扩散钎焊问题,相对于某一宽度区域的无限系统中的扩散,建立扩散钎焊接头的模拟扩散模型见图 1,可取模型的半侧进行模拟。假设中间层 Cu 镀层全部溶化,为液相,宽度为 15  $\mu\text{m}$ ,TC4 母材为固相,中间层在母材中的扩散距离不大于 400  $\mu\text{m}$ 。因界面两侧相的成分不同,在 DICTRA 模拟过程中,选用移动界面模型,中间层元素初始浓度为 100%,TC4 母材中 Al 元素初始浓度为 6%,V 元素初始浓度为 4%,剩余的为 Ti 元素,忽略杂质的影响。

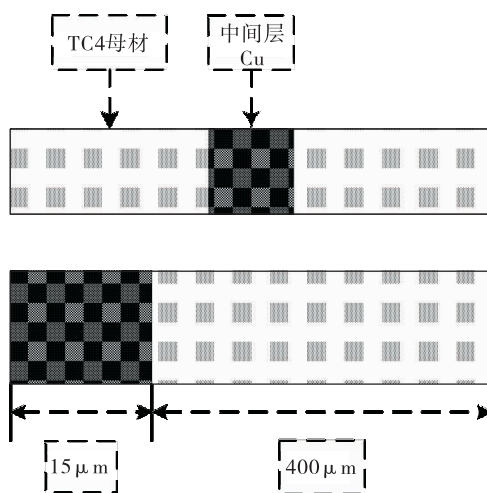


图 1 DICTRA 软件中模拟扩散模型

Fig. 1 Analog diffusion model in software DICTRA

因界面有 Ti-Cu 共晶液相的产出,有利于连接

界面的润湿和贴合,钛合金扩散钎焊对连接压力、焊件表面处理等工艺参数要求不高,中间层厚度、连接温度、保温时间对接头强度影响较大。模拟试验选用中间层厚度、连接温度、保温时间为试验因子,结合相关文献资料<sup>[10-11]</sup>确定每个因子取四个水平,如表 1 所示,以正交试验表  $L_{16}(4^5)$  为基础进行模拟试验,共进行 16 组中间层元素浓度分布的模拟计算,以中间层元素的扩散距离为试验结果,摸索工艺参数对界面附近中间层元素扩散距离的影响趋势。同时,针对喷管的特殊型面结构,进行夹层结构模拟件的扩散钎焊试验,验证模拟计算的正确性。并对扩散接头的微观组织进行观察,从微观的角度研究工艺参数对组织接头的影响。

表 1 因子水平表			
Tab. 1 Factor level list			
水平	中间层厚度/ $\mu\text{m}$	连接温度/ $^{\circ}\text{C}$	保温时间/ $\text{min}$
1	10	880	20
2	15	910	30
3	20	940	40
4	25	970	50

2 模拟结果分析

通过模拟中间层 Cu 元素在钛合金 TC4 中的扩散浓度分布,各参数下接头界面附近 Cu 元素的扩散距离和最大剩余浓度见下表 2,Cu 浓度分布曲线见图 2。

表 2 基于正交试验的 Cu 元素浓度分布表								
Tab. 2 Distribution of Cu element concentration based on orthogonal experiment								
试验号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
Cu 元素扩散距离/ $\mu\text{m}$	130	200	310	380	160	160	330	340
界面 Cu 元素剩余最大浓度/%	22	13	16	12	40	40	14	13.8
试验号	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#
Cu 元素扩散距离/ $\mu\text{m}$	170	250	160	300	180	220	250	250
界面 Cu 元素剩余最大浓度/%	61	33	48	43	85	65	47	53

从表 2 可以发现,当中间层厚度为 10  $\mu\text{m}$  和 15  $\mu\text{m}$  时,界面 Cu 元素剩余最大浓度为 12% ~ 40%,而中间层厚度为 20  $\mu\text{m}$  和 25  $\mu\text{m}$  时,界面 Cu 元素剩余最大浓度为 33% ~ 85%,原因分析可能为:(1)中间层太厚,在限定的工艺参数下,连接温度 880 ~ 970  $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间 20 ~ 50 min,扩散动力不足,Cu 元素扩散不充分,在界面大量残留;(2)可能界面已生成  $\text{Ti}_x\text{Cu}_y$  金属间化合物,结合 Cu-Ti 共晶相图分析,Cu 元素在母材 TC4 中扩散过程中,有可能生成  $\text{TiCu}_3$ ,  $\text{Ti}_2\text{Cu}_3$ ,  $\text{TiCu}$ ,  $\text{Ti}_2\text{Cu}$  等金属间化合物,其 Cu 含量分别为 79.9%, 66.5%, 57% 和 39.8%,模拟计算中界面 Cu 元素剩余最大浓度与  $\text{Ti}_x\text{Cu}_y$  金属间化合物中 Cu 元素的浓度接近。 $\text{Ti}_x\text{Cu}_y$  金属间化合物为脆性相,在钛合金材料扩散连接中应尽量避免产生。基于上述分析,表明钛合金扩散钎焊的中间层厚度应不大于 20  $\mu\text{m}$ 。

以仿真计算得出的中间层 Cu 元素的扩散距离为试验结果,采用方差分析法,进行数据分析,得出中间层厚度、连接温度、保温时间的方差分析表,见表 3。当取显著水平  $\alpha = 0.01$ ,由  $F$  分布分位表可得临界值  $F_{1-\alpha}(f_j, f_e) = F_{0.99}(3, 6) = 9.78$ ,  $f_j = t-1$  为因子自由度,  $t$  为因子的不同水平个数,  $f_e$  为正交试验表中所有空列对应的自由度相加。因连接温度的  $F$  值  $F_2 = 59.0 > 9.78$ ,保温时间  $F_3 = 28.7 > 9.78$ ,中间层  $F_1 = 3.7 < 9.78$ 。分析可知,连接温度、保温时间对试验指标有显著影响,而中间层厚度对中间层的扩散距离没有显著影响,即可认为中间层厚度是影响扩散距离的次要因素。连接温度对扩散距离影响最大,其次为保温时间。各因素对中间层扩散距离的影响的主次顺序是连接温度 > 保温时间 > 中间层厚度。

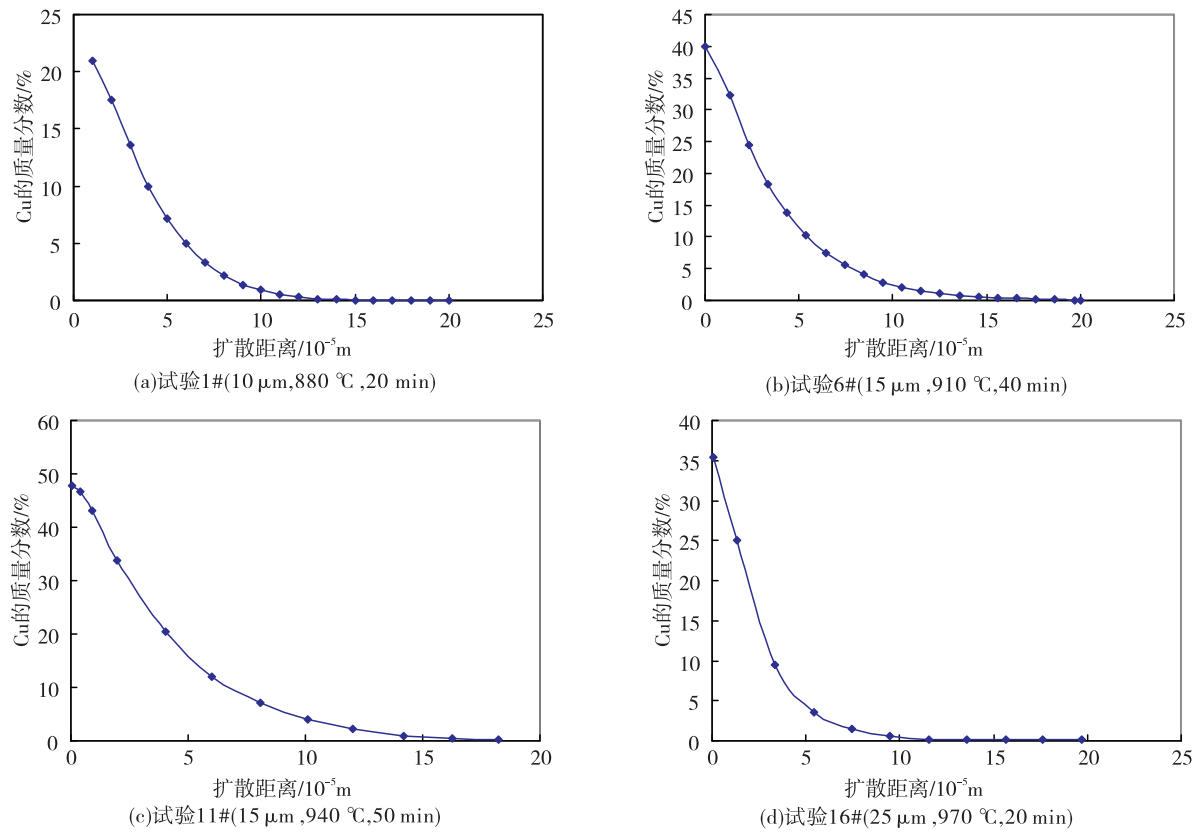


图 2 部分基于正交试验的 Cu 元素浓度分布规律

Fig. 2 Some distribution of Cu element concentration based on orthogonal experiment

表 3 无交互作用三因子方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方和	$F$ 值	显著性
厚度	$S_1 = 3\ 469$	$f_1 = 3$	$S_1/f_1 = 1\ 156.3$	$F_1 = 3.7$	
连接温度	$S_2 = 55\ 719$	$f_2 = 3$	$S_2/f_2 = 18\ 573$	$F_2 = 59.0$	**
保温时间	$S_3 = 27\ 069$	$f_3 = 3$	$S_3/f_3 = 9\ 023$	$F_3 = 28.7$	*
误差	$S_e = 1\ 888$	$f_e = 6$	$S_e/f_e = 314.7$		

为了更为直观地看出工艺参数(中间层厚度、连接温度、保温时间)对中间层 Cu 元素扩散的影响规律,绘制各工艺参数下中间层 Cu 元素浓度分布趋势图(图 3,图 4 和图 5)。钛合金扩散钎焊的最优工艺参数组合为中间层厚度 10  $\mu\text{m}$ 、连接温度 970  $^{\circ}\text{C}$ 、保温时间为 50 min。

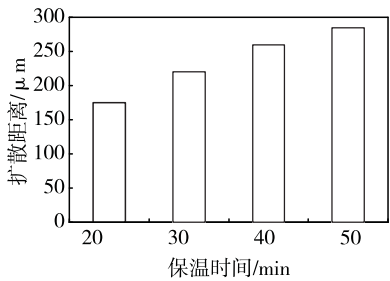
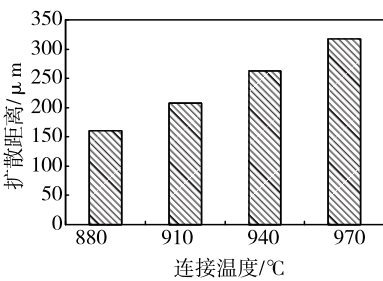
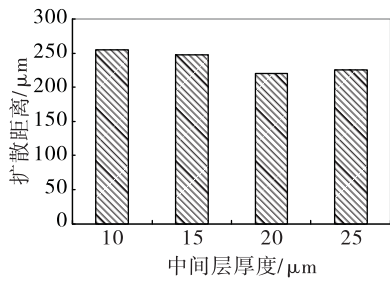


图 3 中间层厚度对扩散距离的影响趋势 图 4 连接温度对扩散距离的影响趋势 图 5 保温时间对扩散距离的影响趋势

Fig. 3 Influence of interlayer thickness on diffusion distance Fig. 4 Influence of bonding temperature on diffusion distance Fig. 5 Influence of temperature holding time on diffusion distance

### 3 试验材料和方法

试验以 TC4 材料夹层结构的试验件(如图 6 所示)为研究对象,其中盖板为 TC4 板材,底板为 TC4 棒材,底板上槽宽/筋宽比为 3。

焊接试验在真空钎焊炉中进行,为防止钛合金氧化,将零件放入保护工装中,并对其抽真空,真空度小于  $8 \times 10^{-6}$  MPa,同时对炉膛内充氩气,压强达到 0.18 MPa,利用高温下气体压差及工装材料的高温蠕变,实现对夹层结构零件的加压,保证盖板与底板的贴合。焊后,进行试验件的液腔强度试验,以其液压强度作为评价焊接质量的标准,扩散钎焊接头强度约为液

腔强度的 3 倍。同时对扩散接头的微观组织进行观察,从微观的角度研究工艺参数对组织接头的影响。

### 4 试验结果与分析

以正交实验表为基础,严格按正交试验方案进行钛合金夹层结构模拟件的扩散钎焊试验,以液压强度来评定焊接接头的强度,利用方差分析对试验结果进行统计分析。可得出中间层厚度、连接温度、保温时间对钛合金夹层结构扩散钎焊接头强度的影响趋势为连接温度 > 保温时间 > 中间层厚度(图 8,9,10)。液腔强度试验后的夹层结构试验件见图 7。

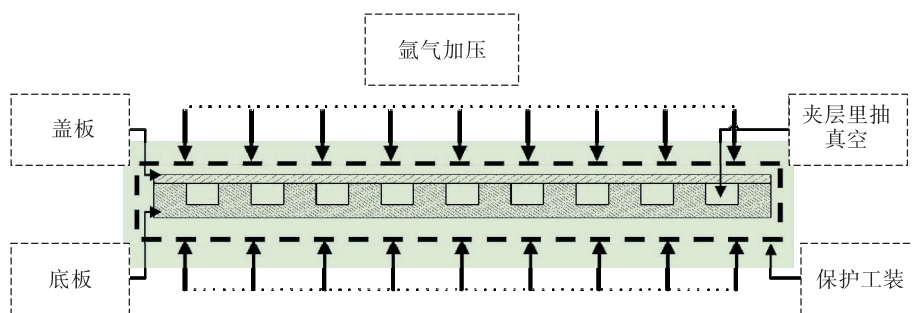


图 6 夹层结构零件扩散钎焊示意图

Fig. 6 Diagram for diffusion brazing of sandwich structure parts

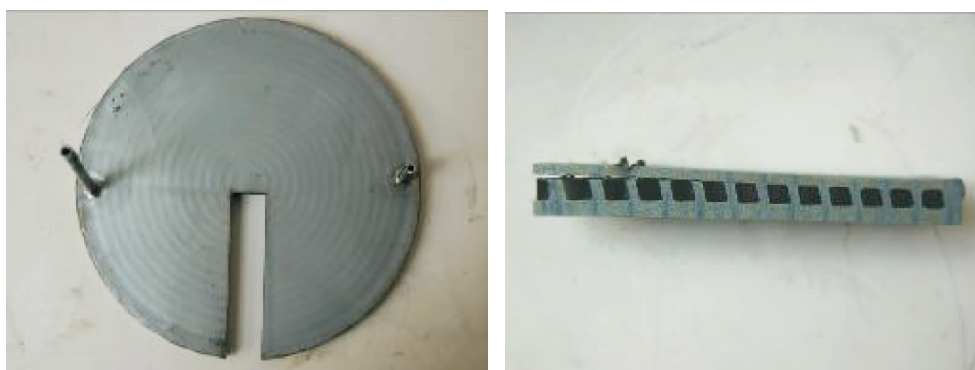


图 7 夹层结构试验件

Fig. 7 Test piece with sandwich structure

由图 8 可以看出,中间层厚度从 10  $\mu\text{m}$  变化到 25  $\mu\text{m}$  范围里,接头强度范围为 109 ~ 112 MPa,变化幅度为 3 MPa。随着中间层厚度的增加,接头强度先增大后减少,当中间层厚度为 20  $\mu\text{m}$ ,接头强度最大,随后接头强度降低,表明中间层厚度 20  $\mu\text{m}$ ,为一个临界值,钛合金扩散钎焊中间层的厚度不应

超过该值,符合模拟计算的结果,表明模拟计算的正确性。

由图 9 可以看出,连接温度在 880 ~ 970  $^{\circ}\text{C}$ ,接头强度波动范围为 75 ~ 140 MPa,变化幅度为 65 MPa。由图 10 可以看出,保温时间在 20 ~ 50 min,接头强度波动范围为 94 ~ 129 MPa,变化幅



度为 35 MPa。通过分析工艺参数对夹层结构零件液压强度的影响趋势,明显看出保温时间-液压强度的斜率比连接温度-液压强度的斜率平缓,而中间厚度-液压强度的斜率,几乎成直线,因此可以认为连接温度对夹层结构扩散钎焊的接头强度影响最大,

保温时间次之,中间层厚度的影响最小,可忽略。最优的工艺参数组合为中间层厚度 20  $\mu\text{m}$ 、连接温度 970  $^{\circ}\text{C}$ 、保温时间为 50 min。工艺参数对接头强度的影响趋势,与模拟计算的结果一致,表明了所建扩散钎焊模型的正确性。

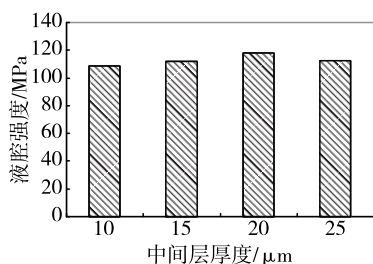


图8 中间层厚度对接头强度的影响趋势  
Fig. 8 Influence of interlayer thickness on joint strength

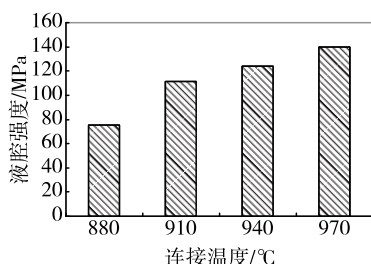


图9 连接温度对接头强度的影响趋势  
Fig. 9 Influence of bonding temperature on joint strength

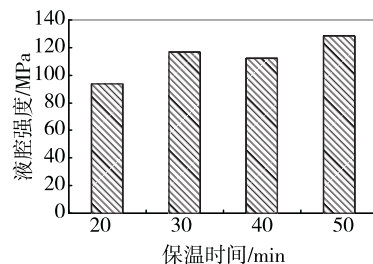


图10 保温时间对接头强度的影响趋势  
Fig. 10 Influence of temperature holding time on joint strength

#### 4.1 连接温度对焊接接头的影响

由图9可以看出,随着连接温度的提高,接头强度呈现递增的趋势。在880~910  $^{\circ}\text{C}$ 区间,接头强度显著增大,增幅为36 MPa,相比较而言,在910~970  $^{\circ}\text{C}$ 区间,接头强度缓慢增大,增幅为29 MPa,可见连接温度910  $^{\circ}\text{C}$ 为转折点,钛合金扩散钎焊温度应高于该值。

连接温度的变化对连接初期表面凸起部位的塑性变形、扩散系数、表面氧化物向母材内的溶解以及界面孔洞的消失过程等产生显著影响。通常情况下,扩散接头强度随着连接温度的提高,先增加后减少,呈开口向下抛物线的趋势。但是通过文中的正交试验结果分析,接头强度随着温度的加大而增大,出现这种情况的原因是在880~970  $^{\circ}\text{C}$ 范围内,随着温度的升高,促进了中间层的塑性变形,界面结合情况得到改善。同时由扩散系数 $D$ 与温度 $T$ 的 Arrhenius 方程,  $D = D_0 \exp(\frac{-Q}{RT})$ , 式中 $D_0$ 为扩散常数, $Q$ 为扩散激活能。

可知,温度是扩散系数的决定因素,温度越高,扩散系数越大,中间层元素扩散速度越快,使得扩散越来越充分,因此接头强度上升。

当保温时间为50 min时,不同温度下试验件(13#,10#,7#,4#)焊缝的金相组织见图11。接头区域基本分为3个层次,盖板TC4板材固溶体、反应

层和底板TC4棒材固溶体,13#,10#,7#和4#试验件反应层厚度分别为90  $\mu\text{m}$ 、130  $\mu\text{m}$ 、130  $\mu\text{m}$ 和260  $\mu\text{m}$ ,反应层中心最高Cu含量为20.36%,12.36%,5.99%和4.89%,其中试验件13#和10#可观察到白亮色的富铜组织,见图11(a)和11(b)。当连接温度为880  $^{\circ}\text{C}$ 与910  $^{\circ}\text{C}$ 时,温度偏低,扩散动力不足,中间层Cu元素扩散不充分,接头强度偏低;当连接温度为970  $^{\circ}\text{C}$ 时,接头强度最高,但是该温度接近TC4的相变温度,模盒接头区域晶粒已过分长大,见图11(d),使得接头变硬而脆,其韧性变差。当连接温度为940  $^{\circ}\text{C}$ 时,接头强度满足要求,接头区域为针状魏氏组织,Cu元素扩散较为充分,焊角饱满,见图11(c),分析认为在该温度下,高于共晶温度50  $^{\circ}\text{C}$ ,有利于共晶液相的流动和界面的贴合,可见,扩散温度940  $^{\circ}\text{C}$ 相对较为合理。

#### 4.2 保温时间对焊接接头的影响

由图10可以看出,随着保温时间的延长,接头强度呈逐步上升的趋势,增幅为35 MPa。在20~30 min区间,接头强度显著增大,增幅为23 MPa,在30~50 min增幅为12 MPa,可见保温时间30 min为转折点,钛合金扩散钎焊保温时间应高于30 min。

当保温30 min和40 min时,接头强度变化不大,幅度约为4 MPa。原因分析可能是因为在30~40 min小范围里,中间层的元素扩散程度差不多,此时接头强度呈稳定的趋势。但是从总体的接头

强度与保温时间趋势曲线来看,随着保温时间的延长,中间层元素扩散深度不断的增加,扩散也越来越充分,接头强度增大。从试验件的爆破情况

来看,当保温 20 min 和 30 min 时,大部分都鼓起或在低压力下爆破,因此保温时间应尽量超过 30 min。

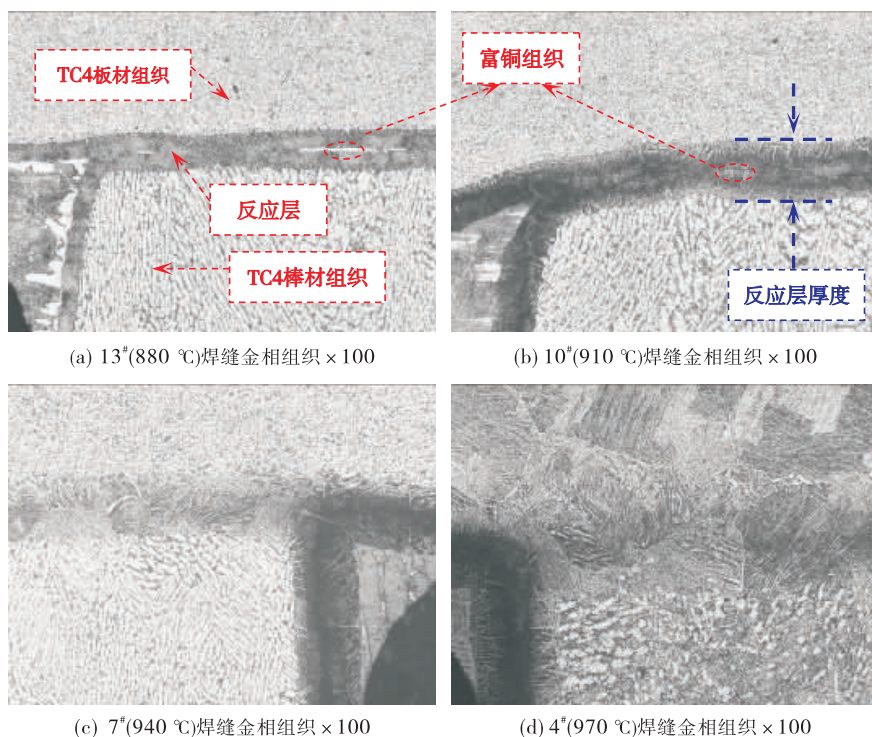


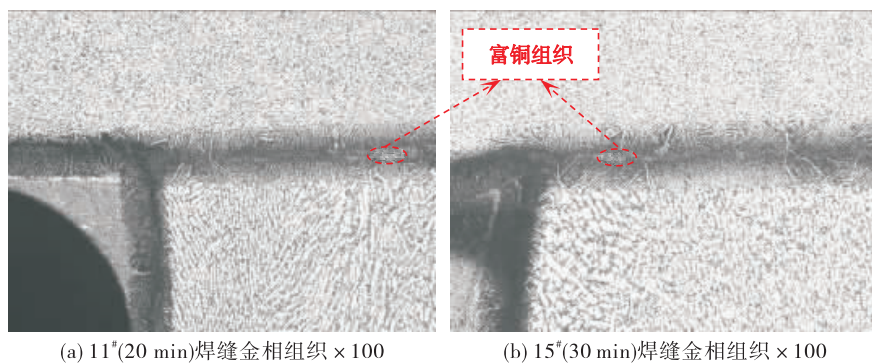
图 11 不同温度下焊缝金相组织

Fig. 11 Metallographic structure of joints at different temperatures

当连接温度为 940 °C 时,不同保温时间下试验件(11#,15#,3#,7#)焊缝的金相组织见图 12。11#,15#,3#和 7#试验件反应层厚度分别为 130 μm,150 μm,120 μm 和 130 μm,反应层中心最高 Cu 含量为 10.33%,9.02%,7.08%和 5.99%。试验件 11#和 15#接头区域可观察到少量的富铜组织,表明当保温时间为 20~30 min 时,中间层 Cu 元素来不及扩散,影响接头强度;试验件 3#,保温时间为 40 min,焊缝组织为扩散充分的针状魏氏组织,但存在孔洞

缺陷;试验件 7#,保温时间为 50 min,接头区域为针状魏氏组织,与试验件 3#相比,组织未见粗大,表明当保温时间为 50 min,焊缝组织不会长大。可见,选取保温时间为 50 min,较为合理。

结合钛合金夹层结构零件的液压强度和焊缝微观组织分析可知,较优工艺参数组合为中间层厚度 20 μm、连接温度为 940 °C,保温时间为 50 min,能满足产品的使用要求,焊缝强度约为 TC4 母材强度的 50%。



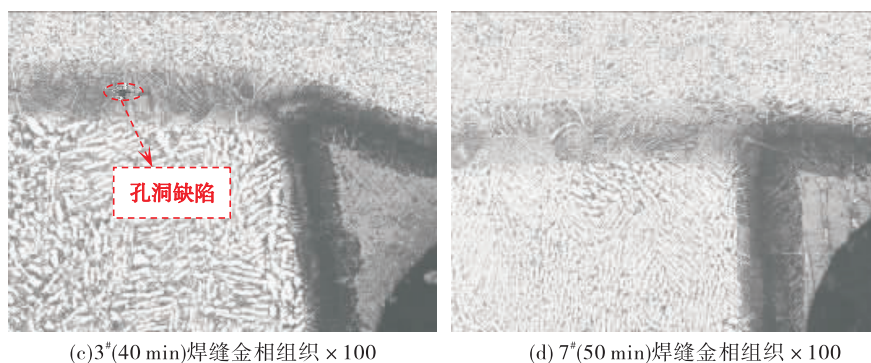


图12 不同保温时间下焊缝金相组织

Fig. 12 Metallographic structure of welded joints at different temperature holding times

## 5 结论

1)建立了钛合金扩散钎焊的扩散模型,通过该模型计算了中间层 Cu 元素的分布规律,为工艺参数的设计提供了理论依据,结果表明钛合金扩散钎焊的中间层厚度不宜超过 20  $\mu\text{m}$ ;连接温度、保温时间对中间层 Cu 元素的扩散距离有显著影响,而中间层厚度对扩散距离没有显著影响,工艺参数对中间层元素的扩散距离的影响程度为连接温度 > 保温时间 > 中间层厚度。

2)通过钛合金夹层结构模拟件的液压强度试验表明,表明钛合金扩散钎焊中间层厚度不宜超过 20  $\mu\text{m}$ ,工艺参数对接头强度的影响趋势为连接温度 > 保温时间 > 中间层厚度,符合模拟计算的结果;最优的工艺参数组合为:中间层厚度为 20  $\mu\text{m}$ ,连接温度为 940  $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间为 50 min,接头强度约为母材强度的 50%,达到了产品的使用要求。

3)接头强度随连接温度的提高急剧增大,当连接温度为 880 ~ 910  $^{\circ}\text{C}$  时,接头区域存在富铜组织,连接温度应高于 910  $^{\circ}\text{C}$ ;连接温度为 970  $^{\circ}\text{C}$ ,接头区域晶粒变大并脆化,降低了接头的力学性能;连接温度为 940  $^{\circ}\text{C}$ ,接头区域为魏氏组织,力学性能较优。接头强度随保温时间的延长逐渐增大,当连接温度为 940  $^{\circ}\text{C}$  时,保温时间为 20 ~ 30 min 时,接头区域存在富铜组织,保温时间应大于 30 min;保温时间为 50 min 时,晶粒无粗大现象。

## 参考文献:

- [1] 姚凯,范振红,李玉国. 瞬时液相扩散焊的发展及应用前景[J]. 石油工程建设, 2007, 33(2): 1-4.
- [2] OZDEMIR N, BILGIN B. Interfacial properties of diffusion bonded Ti-6Al-4V to AISI304 stainless by inserting a Cu inter-layer [J]. Int adv manuf technol, 2009(41): 519-526.
- [3] 元哲石,徐立新,吴执中,宋敏霞. Ni + Cu 为中间层的 TC4 与 ZQSn10-10 扩散连接试验分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 92-95.
- [4] YUAN X J, SHENG G M, QIN B, HUANG W Z, et al. Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel [J]. Materials characterization, 2008(59): 930-936.
- [5] 焦少阳,董建新,张麦仓,等. 耐蚀合金/碳钢热等静压扩散连接反应层元素互扩散规律研究[J]. 材料工程, 2009, 12(1): 10-15.
- [6] ELREFAEY A, TILLMANN W. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer [J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209: 2746-2752.
- [7] 郭世敬,陈思杰,梁峰. 瞬间液相扩散连接中间层的研究[J]. 金属铸锻焊技术, 2009, 38(9): 97-99.
- [8] 王英杰,杨卫鹏. 铌钎管延伸段激光电焊工艺研究[J]. 火箭推进, 2017, 43(6): 88-96.

WANG Y J, YANG W P. Research on laser spot-welding technology of Nb-Hf alloy nozzle extension section [J]. Journal of rocket propulsion, 2017, 43(6): 88-96.

(编辑:陈红霞)