TC4钛合金超塑性成形—扩散连接组合工艺研究

六二五所　赵　玮　宋飞灵　王纯孝

一、前　言

由于钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好等优点，它已成为宇航工业中很有前途的一种金属材料，但是由于存在冷加工工艺性差、成形困难等缺点，在很大程度上阻碍了它的广泛应用。

六十年代末期美国人首先发明了钛合金的超塑性成形-扩散连接组合工艺技术(简称组合工艺或SPF/DB)。七十年代美国空军与主要的几家航空公司签订了一项1400万美元的"B-LATS计划"[1]（即低成本、先进的钛合金结构组合工艺发展计划），以其中的600万美元用于发展钛合金SPF/DB组合工艺技术。现今美国几家主要的航空公司已成功地制造了一些大型的复杂结构件，如B-1轰炸机上用的中央翼盒、隔框、口盖等66种部件；F-15战斗机的后机身壁板、波纹板、发动机喷口整流片等；F-14的钛合金空心叶片；在制造航天飞机的结构件中也采用了此项新技术。据洛克威尔公司报道，美国现在有九种飞机采用SPF/DB的钛合金结构件，作为生产型机种的B-1B轰炸机已正式采用，其它机种正进行试飞。

经初步估算表明：采用此项新工艺技术制造钛合金结构件与常规制造方法相比较，它能使飞机结构件的重量减轻30%，成本降低50%左右[2]。

近几年来，英、苏、日等国也都积极开展了此项新工艺的研究工作，并已制成一些典型的结构件。英国已在个别机种上进行了试用。

由此可见，此项新技术的出现，不仅为钛合金在宇航或其它工业中的推广应用创造了有利的条件，而且还为压力加工和连接技术开拓了一个新的工艺领域。目前此项技术尚处于进一步研究和发展中。

我国对钛合金成形的研究和应用已做了不少的工作，对钛合金SPF/DB组合工艺也进行了一些研究，我们正在进行这方面的工作。现仅将初步的研究工作情况概括介绍如下。

二、工艺装置

1. 方案选择

据资料报道，国外进行组合工艺研究的方法可分为两类：①先连接后成形；②先成形后连接[3,4]。前者对模具结构的设计要求不很高，但工艺方面难度较大，并需涂敷止焊剂。该方法尤其适用于制作由多层钛板组成的复杂的夹层结构件。后者仅适用于制作较为简单的波骨壁板结构件，但对模具的设计要求较高。这两种方法我们均进行过大量的试验，并制作了各种类型的结构件。根据舱门的设计要求，我们选择了前一种方法。图1为近几年来我们研制的部分结构件及性能试验件。

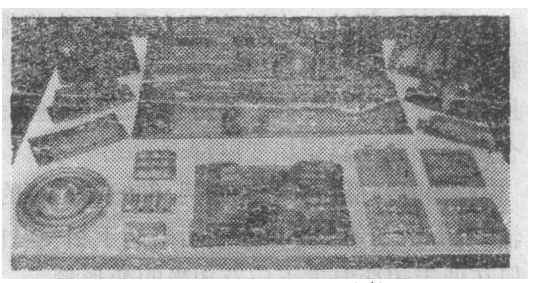


图 1　研制的部分试验件

2. 设备部分

我们研制的专用设备如图2、3所示。它们

主要包括六个部分：加热平台、加热元件、液压系统、真空系统、气体控制系统和电源控制系统。

图 2　加热加压装置

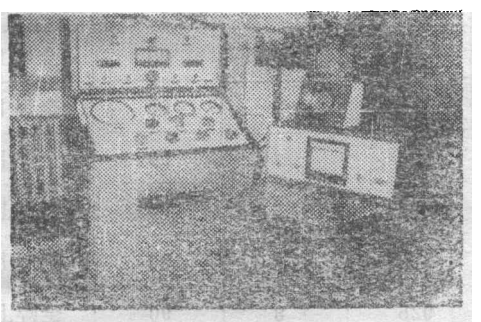


图 3　控制装置

该设备的工作台面尺寸为1500×1000mm，压力100t，功率 55kV，正常工作温度950℃。

三、波骨壁板的组合工艺研究

1. 概　述

用TC4合金以组合工艺方法制成波骨壁板结构，是七十年代成形方面的突出成就之一。

一般认为具有超塑性的钛合金应具备下列主要条件：细晶粒，等轴晶粒和双相组织。试验证明，目前国产的TC4钛合金的晶粒尺寸小于10μm，具有较好的超塑性性能。

我们在组合工艺中采用的扩散连接方法是不加任何中间介质，完全靠连接面上的金属原子间互相扩散以达到连接目的的一种方法。它的主要优点是：

（1）接头区无铸造组织、脆性区、裂纹等；

（2）同种金属的连接能获得基本上与母材相同的物理的、化学的和机械的性能；

（3）在接头区不生成象钎焊那样的低熔点区域；

（4）连接性能与母材的厚度无关；

（5）扩散连接和热处理可以结合进行，很多接头也可以一次连接成功。

扩散连接的主要过程如图4所示。

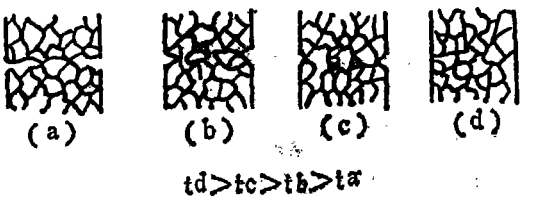


图 4　扩散连接的图形表示

组合工艺的最大特点就是把成形和连接有机地结合在一起，从而制出一般工艺方法无法一次加工成的复杂结构件。对于TC4钛合金来说，能实现这种组合的基础就在于它的超塑性成形与扩散连接所要求的条件正好相似。

2. 工作原理与工艺流程

我们采用的是先扩散连接后超塑性成形的方案，其工作原理参照图5。首先是把清洗干净的钛板涂上止焊剂，然后放入模具内开始升温(图5a)。达到钛合金的超塑性成形温度以后向模腔内吹入高压氩气，进行扩散连接(图5b)。扩散连接结束之后，放掉模腔内的高压气体，向钛板内缓慢送入氩气进行超塑性成形(图5c)，全部工艺过程完成以后（图5d）冷至350℃以下取出试件。

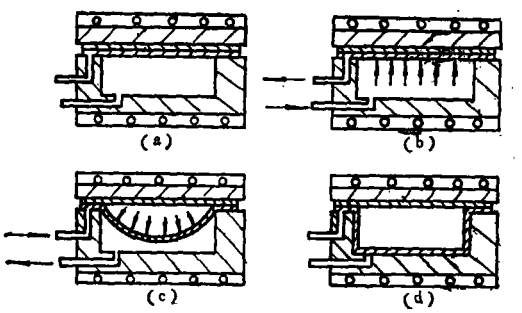


图 5　组合工艺的工作原理

通过大量的工艺试验，最后确定了如下的工艺流程：

下料→除油→酸洗→烘干→
密封试件→开进气嘴→装配→净化试件→
升温→加压扩散→卸压→加压成形→
卸压→冷却→取出试件

3. 组合工艺的参数试验

全部试验用的材料都是厚度为0.8mm的退火状态国产TC4板材。试件尺寸为150×150mm。试件形状如图6所示。

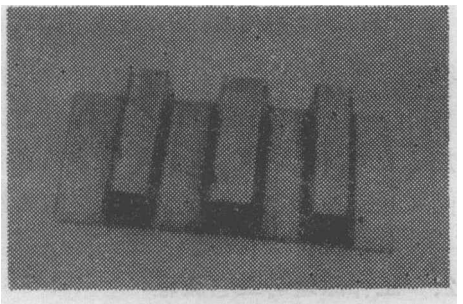


图 6 波骨试件

扩散连接和超塑性成形的工艺参数及结果见表1和表2。

根据表1和2试验结果，确定的工艺参数是：超塑性成形温度915±10℃；成形压力0.8～1MPa；总成形时间60～120min。

扩散连接温度915±10℃；连接压力1MPa；连接时间90min。

按照上列规范制作了几种典型试验件，部分小型试验件示于图1中的下半部分。

四、质量检查

1. 机械性能试验

为了测定不同规范处理后的原材料和制成

表 1 扩散连接的工艺参数及结果

序号	连接温度 °C	连接压力 kgf/cm²*	连接时间 min	结果
1	900	6	60	未完全焊上
2	900	6	90	全焊上
3	900	7	60	全焊上
4	900	7	90	全焊上
5	900	7	90	全焊上
6	900	7	90	全焊上
7	925	8	90	全焊上
8	925	10	90	全焊上
9	925	10	90	全焊上

* 1kgf/cm²≈0.1MPa。

表 2 超塑性成形的工艺参数及成形结果

试件号	成形温度 °C	成形压力 kgf/cm²	加压速度 格/min*	加压时间 min	保压时间 min	总成形时间 min	成形高度 mm	成形结果
1	900	6	2.5	30	30	60	15	良好
2	900	6	2.5	30	15	45	15	良好
3	900	6	2	38	0	38	15	未完全贴模
4	900	6	3	25	30	55	15	良好
5	925	6	5	15	15	30	15	未完全贴模
6	925	6	5	15	30	45	15	良好
7	925	6	5	15	10	25	13	未完全贴模
8	925	8	3	32	30	62	15	良好
9	925	6	7.5	10	30	40	15	吹破
10	925	6	1.5	50	0	50	5	未贴模

* 格相当于0.083kgf/cm²的压力≈0.0083MPa。

的波骨壁板结构件的机械性能，我们进行了拉伸试验，部分结果见表3。

表 3　波骨壁板（925℃制作）拉伸试验结果

状态	试件编号	σ_b kgf/mm²*	δ %	平均值 σ_b kgf/mm²*	平均值 δ %
原材料经SPF加热规范处理后	1	89.5	19.3	90.2	21.6
	2	89.6	20.0		
	3	90.0	22.6		
	4	80.0	22.6		
	5	92.5	22.0		
	6	94.5	20.6		
	7	95.4	24.0		
经SPF/DB后的波骨	8	86.7	13.0	89.4	15
	9	88.0	17.4		
	10	91.1	7.8		
	11	95.0	18.3		
	12	93.6	17.8		
	13	91.7	14.4		
	14	92.1	14.8		
	15	90.0	14.8		
	16	91.1	16.1		
	17	82.7	13.9		
	18	86.9	15.6		
	19	90.5	15.6		
	20	82.5	15.6		

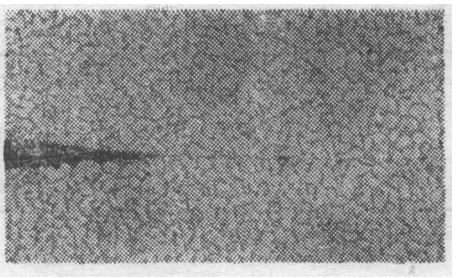
* 1kgf/mm²≈10MPa。

该试验结果表明，TC4板材经组合工艺过程后，性能（拉抗强度和延伸率）均有所变化，但差异不是很大。

2. 扩散连接接头

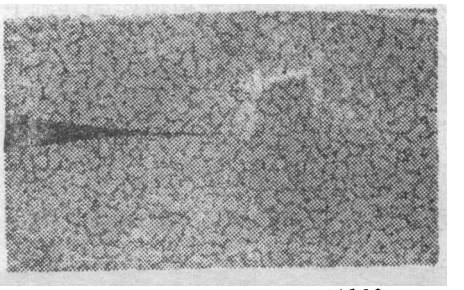
从波骨壁板的连接部位切取金相试片以检查扩散连接的质量，结果见图7、8。从这些图中可以看出，在选择了合适的扩散连接规范参数条件下，就能得到良好的连接接头。

此外，我们还制做了一些搭接的扩散连接试片，并测试了连接部位在不同温度下的强度，



×200

图 7　0.3MPa，60min，900°C（未焊上）



×200

图 8　0.7MPa，60min，900°C（全焊上）

其结果与宝鸡有色金属加工厂所做的TC4板材的抗剪强度相接近，说明连接质量良好。结果见表4、表5。此外，还对剪切试样用扫描电镜进行了断口分析（照片略），结果表明均呈塑性断裂。

表 4　扩散连接搭接试片剪切性能

试件编号	试验温度 °C	剪切强度 kgf/mm²*	平均剪切强度 kgf/mm²*
1	室温	60.8	61.7
2	室温	64.0	
3	室温	60.2	
4	200	67.7	71.9
5	200	69.8	
6	200	78.2	
7	300	51.4	47.3
8	300	44.6	
9	300	45.9	
10	400	51.0	48.8
11	400	44.7	
12	400	50.7	

* 1kgf/mm²≈10MPa。

表 5 抗剪强度（kgf/mm²*）对比

温　度	室　温	200°C	300°C	400°C
宝　鸡	67	55.9	49.1	48.0
六二五所	61.7	71.9	47.3	48.8

* 1kgf/mm²≈10MPa。

五、产品结构件的研制

在研制成波骨壁板和模拟件的基础上，我们在六〇一所和一一二厂的密切合作下，承担了为我国某新机研制钛合金风动泵舱门的任务，该结构件的特点是尺寸较大、变形量大、扩散连接部件多且蒙皮呈曲面。图9、10分别示出风动泵舱门的外形和某部位的横切面形状。

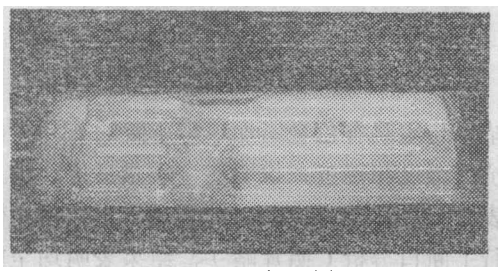


图 9　风动泵舱门

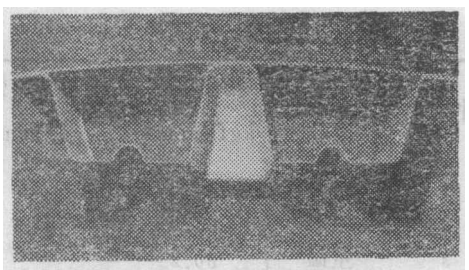


图 10　舱门横切面

我们对研制出的钛合金风动泵舱门的质量，按装机件的技术条件要求进行了全面的检测，主要是外观检查、无损检验、气密试验、残余应力测量、壁厚变化、气体含量、α层厚度、晶粒尺寸、焊合率以及不同部位的机械性能。

检测结果表明，钛合金风动泵舱门的质量比较好，许多数据比较令人满意。我们正继续进行试验工作，进一步提高舱门质量，争取在短期内装机试飞。

通过前一段试验可得出以下结论：

1.研制的专用设备能满足试验和试生产的需要。

2.确定的工艺流程和工艺参数是合适的。

3.成形质量良好，结构件的复杂型面能完全贴模且无残余应力。

4.超塑性成形后，各部位的材料厚薄变化均匀，未发现局部突然变薄的现象。

5.扩散连接质量良好，金属原子完全互相跨越了交界面。

参加此项研究工作的还有王月华、王斌、徐放等同志。

参考文献

〔1〕Fabricating Titanium Parts with SPF/DB Process. Metal Progress, 1977.3.P33—37.

〔2〕Superplastic Forming/Diffusion Bonding Technology in the USAF/McDonnell BLATS program, 1980.

〔3〕Method for Making Metallic Sandwich Structures, U.S. patent 3 927 817.

〔4〕Method and Tools for Producing Superplastically Formedand Diffusion Bonded Structures, U.S. patent 4 087 037.

新的卧式等离子氮化设备

Abar公司引进了一个卧式等离子氮化系统.它是用对流加热和冷却的方式，提高效率，改善产品质量。这种表面硬化设备加热速度快，温度均匀，是宇航工业的理想设备。等离子氮化技术已取得了专利。本系统采用高频电源，而且全自动化。使用者现在不必担心由于电弧形成引起的零件损伤。同时也无须进行表面部位的测量，因为电流密度不再是控制参数。微处理机控制系统，使得成分和扩散区域获得精确组织和深度。可以应用于范围广泛的零件外形和黑色金属的热处理。　（傅孙靖）