

# 钛合金波纹板超塑精密成形工艺研究

王崇胜 吴雪鲁 蔡伯成 张连增  
(北京航空材料研究所)

本文叙述了多层壁式或复合式金属隔热瓦上用的钛合金波纹板采用超塑精密成形工艺的研究结果。已研制成 0.08mm 厚的 80mm×200mm、200mm×200mm 的钛合金双面波纹板。该研究内容为航空航天飞机金属隔热瓦研究中的一部分。

## Study on Process of Titanium Alloy Corrugated Sheet for Superplasticity Precision Forming

Wang Chongsheng Wu Xuelu Cai Bocheng Zhang Lianzeng  
(Beijing Institute of Aeronautical Materials)

In this paper, the corrugated sheet of titanium alloy for multiwall or composite metallic heat-shield tiles has been described. The research result for superplasticity precision forming has been applied. Titanium alloy corrugated sheet of 0.08mm thickness has been researched. This research is a part of the research of metallic heat-shield tiles for space shuttle.

### 一、前 言

具有发展前途的金属隔热瓦用于航空航天飞机的热防护系统。多层壁式或复合金属隔热瓦由多层平行板和双面波纹板交替排列焊接而成。其中双面波纹板厚度为 0.076mm, 隔板为 0.04mm, 根据航空航天飞机上的使用要求, 选材为 TC4 钛合金。

超塑性通常易于在  $\alpha+\beta$  钛合金中获得, 这是由于这种类型的钛合金能在较宽的温度范围内同时存在两个相 ( $\alpha+\beta$ ), 从而有利于获得和保持超细晶粒。TC4 两相钛合金具有优异的超塑特性, 利用这种超塑性进行超塑成形, 可以大大降低变形抗力, 并能利用这种方法制造形状复杂的板材零件和精密零件。超塑成形—扩散连接组合工艺 (SPF-DB) 是 70 年代发展起来的新工艺, 国外资料对于双面酒窝状的波纹板成形与连接, 采用超塑成形—扩散连接组合工艺 (SPF-DB), 但没有具体工艺的报道。在缺乏工艺资料的情况下, 开展了多层壁式或复合式金属隔热瓦的钛合金波纹板超塑精密成形工艺研究。

TC4 合金箔带的轧制是波纹板超塑成形工艺的技术关键之一, 在国内为首次研制, 经过调整冷轧工艺参数和控制带坯冶金质量等技术措施解决了表面裂纹, 轧制出符合波纹板成形质量要求的 TC4 箔材。在超塑精密成形波纹板的研制过程中, 遇到了 TC4 箔材在高温下被污染和在波纹板酒窝处出现裂纹、裂口等技术关键, 经多次试验, 采取多层复合式防护和改进模具设计工艺参数等技术措施, 突

破了上述关键, 研制成了 0.08mm 厚的 80mm×200mm、200mm×200mm 的双面波纹板。

### 二、试验用材料和方法

#### 1. 试验用料

试验用带坯为 902 厂生产的 TC3 (0.35mm 厚) 和 TC4 (0.8mm 厚) 冷轧带, 分别经小二十辊和大二十辊轧机轧制成 0.08mm×80mm 和 0.08mm×280mm 箔带。其化学成分见表 1。

#### 2. 试验方法

波纹板超塑精密成形在 ZKH 真空加压炉中进行, 将 TC3、TC4 箔带放在专用的模具中等温慢速加压成形。超塑成形所加压力为手动的液压系统。双面波纹板形状要求见图 1。

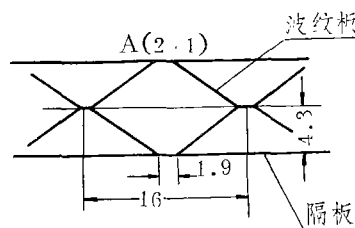


图 1 双面波纹板形状

表 1 试验用钛合金化学成分 (%)

牌 号	Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O
TC3	基	4.8~5.4	3.6~4.0	0.12~0.15	0.02~0.03	<0.08	0.02~0.03	0.014~0.002	0.10
TC4	基	6.15	4.05	0.05	<0.04	0.01	0.02	0.008	0.15

### 三、试验结果

### 1.TC3、TC4 箔带的轧制

厚度为 0.08mm 和 0.04mm、宽度大于 220mm 的 TC3、TC4 钛合金箔带在国内是首次试制。通过一年多试制，试验结果如下：

#### (1) 控制冷轧带坯的冶金质量

要轧制出符合波纹板要求的箔带，需要严格控制 TC4 钛合金化学成分中杂质的含量；其塑性指标要高于一般标准要求。当带坯的冶金质量较差或其表面有污染时，在冷轧变形过程中，带材表面易产生微裂纹而成为废品。

#### (2) 控制冷轧变形程度

根据钛合金带坯的厚度和加工硬化程度，箔带轧制应分为几个轧程，每个轧程的变形程度应进行严格控制，每个轧程间需将带坯进行真空退火和酸洗，TC4 带材的退火温度为 800~900℃。TC3 带材的加工硬化曲线见图 2；不

同变形程度的组织变化见图 3。

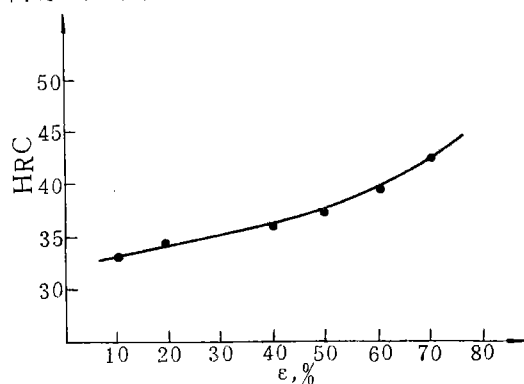


图 2 TC3 带材加工硬化曲线

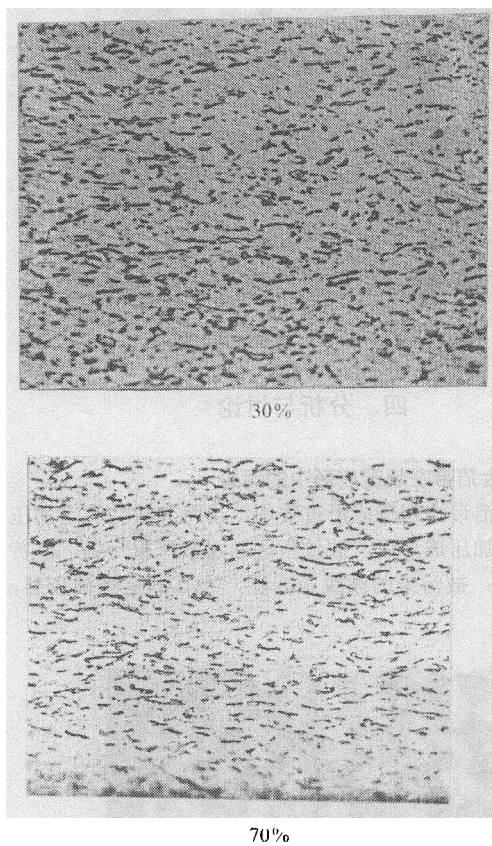
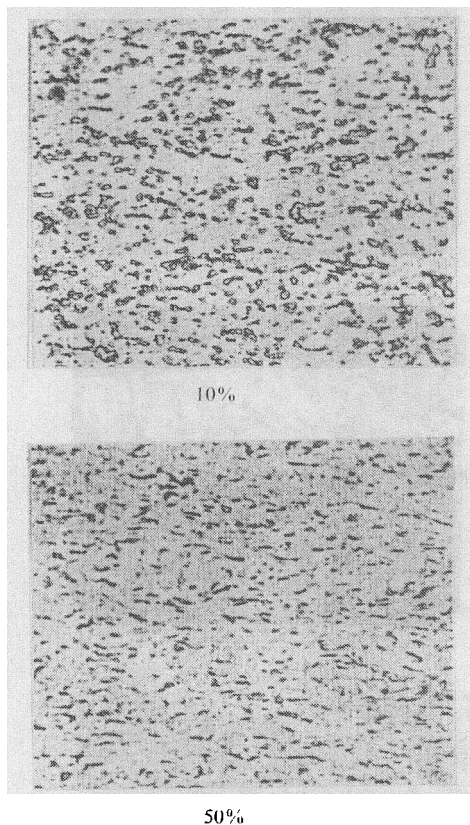


图 3 TC3 带材不同变形量的组织

500×

#### (3) 控制合金的晶粒度

TC3、TC4 钛合金箔带经过最后一个轧程的冷变形后，其组织是超细晶粒，α 相的晶粒尺寸为 5~6μm。

### 2.变形温度和真空度对波纹板成形的影响

根据两相钛合金组织性能的要求，变形温度应在合金 β 相变点以下 50~60℃，要实现超塑成形应选择超塑成形温度。综合考虑选择 TC3 变形温度范围为 880、900、920℃，TC4 的变形温度为 930℃。试验结果见表 2。

从表 2 看出，TC3 变形温度在 900℃ 以下时，波纹板超塑成形时所需压强明显增大，在 920℃ 成形质量较好；TC4 在 930℃ 成形较好。

真空加压炉的真空度对钛合金波纹板成形质量影响较

大，若炉内真空度在  $10^{-2}$ Pa 梯度范围内，波纹板表面呈淡

表 2 波纹板超塑成形试验结果

合金牌号	成形温度,℃	加压时间,分	油压表压强,MPa	加压炉真空度,Pa	波纹板表面质量
TC3	880	10~15	0.7~0.8	$0.6 \times 10^{-2}$	浅黄色、有污染
	900	10~15	0.6~0.7	$2.8 \times 10^{-3}$	银白
	920	10~15	0.5~0.6	$0.6 \sim 2.0 \times 10^{-2}$ $3.3 \times 10^{-3}$	黄色、有污染 银白色
TC4	930	10~15	0.5~0.6	$3.2 \times 10^{-3}$	银白色

黄色或黄色，其表面有污染；若炉内真空度在  $10^{-3}$ Pa 梯度

范围以上并采取多层复合式防护措施, 波纹板表面没有污染而呈银白色。

研制成的 80mm×200mmTC3 双面波纹板见图 4, 200mm×200mm 的 TC4 双面波纹板见图 5。

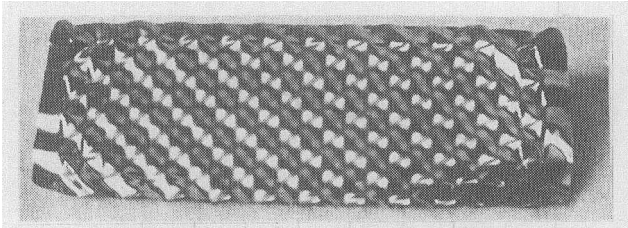


图 4 80×200mmTC3 双面波纹板

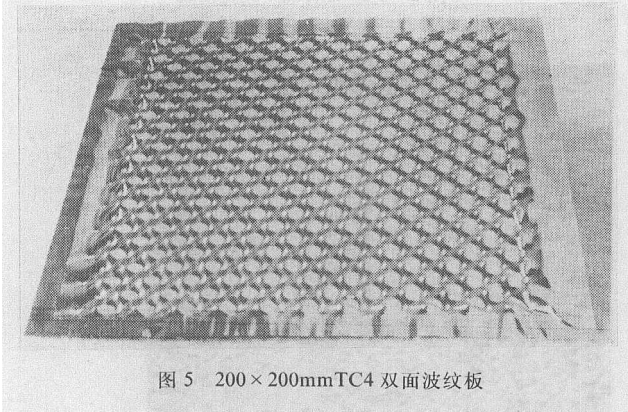


图 5 200×200mmTC4 双面波纹板

#### 四、分析与讨论

##### 1. 钛合金箔带在超塑成形中的污染

钛合金箔带在超塑成形过程中, 当将其放在真空加压炉中加温、加压成形后, 波纹板表面层被严重污染, 呈黄灰色或黄色, 被污染的波纹板变脆, 在其酒窝处被压裂, 见图 6。

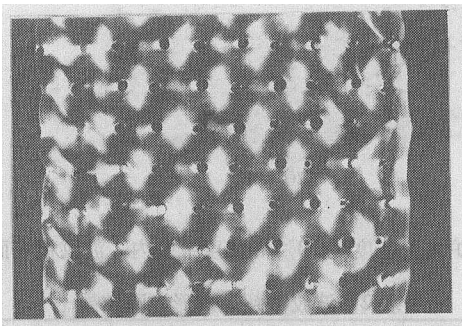


图 6 被污染的波纹板

对被污染的波纹板进行气体含量分析, 波纹板表面呈黄灰色时, 其氧气含量为 0.58%; 表面成黄色时, 其氧气含量为 0.31%, 均超过 GB3620-83“钛及钛合金牌号和化学成分”中的规定 ( $<0.20\%$ ), 氢气含量为 0.006%, 在标准规定范围内。对被污染的波纹进行扫描电镜分析, 其断口为脆性断口, 见图 7 (a)、(b)。经多次试验研究为解决钛合金箔带在超塑成形中的污染问题, 采取了多层复合式防护、严格控制真空加压炉的真空度等减少污染的技术措

施, 超塑成形的波纹板表面呈银白色, 经扫描电镜分析, 其断口为窝状韧性断裂, 见图 7 (c)、(d)。

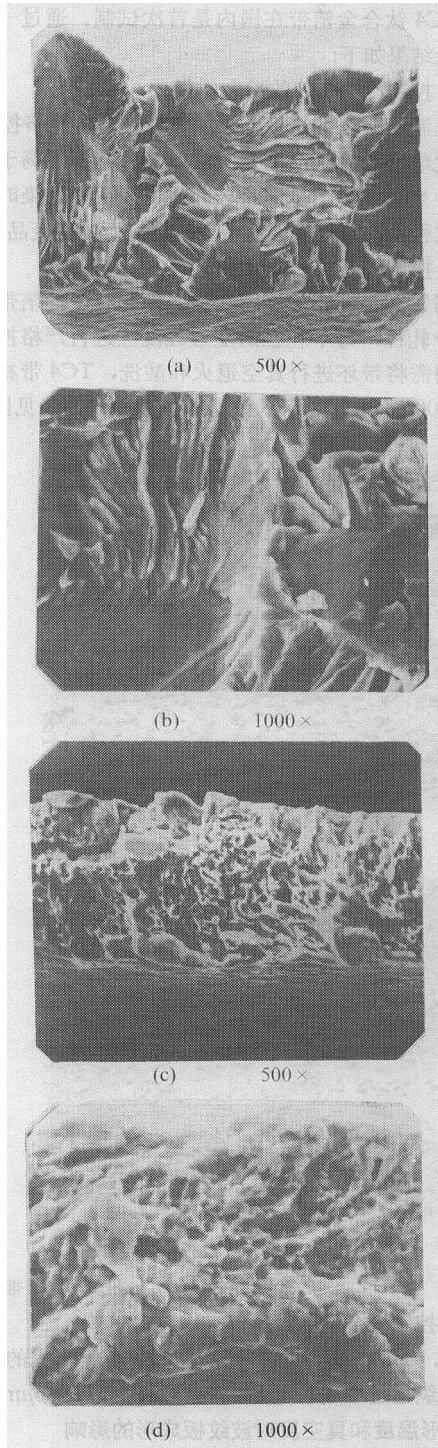


图 7 波纹板断口分析

##### 2. 波纹板成形质量控制

(1) 在双面波纹板研制过程中曾在波纹板酒窝尖角处多次出现裂纹, 有的被压成裂口。经分析这不仅与箔带的表面层被氧气污染后性能变脆有关, 还与成形模具设计尺寸有关。图中每个酒窝形状似一个拉延模, 试验证明其拔模斜度之间夹角太小, 会造成局部变形加大, 在酒窝的尖角处被压坏。将夹角加大并把酒窝处圆角从 1mm 加大到

1.5mm 后，波纹板成形质量很好。改进后的波纹板超塑成形模具见图 8。

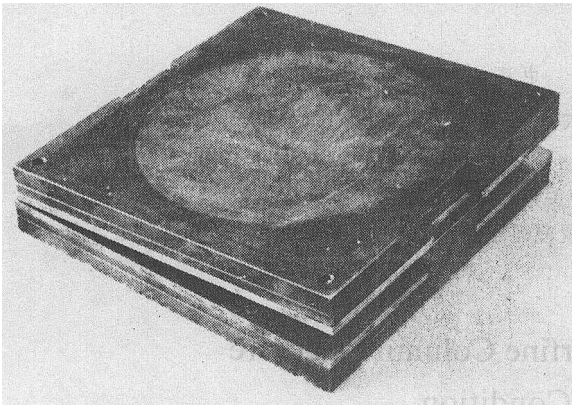


图 8 波纹板超塑成形用模具(200mm×200mm)

(2) 波纹板波纹高度 (4.3mm) 的控制，主要采用精锻技术中常用的吻合板来进行，经过计算设计了几种规格的吻合板，试验证明 5.10mm 高度的吻合板，可以保证压出高度为 4.3mm 的双面波纹板。

通过以上工艺措施保证了波纹板成形质量，用金相显微镜测量波纹板厚度均匀性，多点测量结果证明波纹板厚度均匀控制较好，测量 10 点厚度平均值为 0.077mm (见图 9、表 3) 符合波纹板尺寸设计要求；波纹板的金相组织见图 10，均为超细晶粒。



图 9 波纹板厚度均匀度 67×

(上接第 54 页) 因此，许多厂家已把热等静压处理当作铸件生产的必经工序，使铸件的合格率进一步提高。这种技术对于定向和单晶合金叶片，也十分有效。美国 L.G.Fritzsche 和法国 T.khan 等人研究了热等静压对单晶合金疲劳性能的影响。图 19 示出热等静压和温度梯度的影响。从图中可以看出，如果采用高的温度梯度并进行热等静压处理，再加上合适的热处理工艺，可显著提高叶片性能。

### 提高叶片生产的自动化程度

自动化生产不仅减轻劳动强度，而且大大提高铸件的质量。国外在定向凝固和单晶铸造方面的自动化，近十年来已有惊人的进展，这也是定向和单晶铸造技术发展的显著标志之一。80 年代初，美国 PW 公司第一台电子束熔化浇注全自动定向炉问世，可生产多种定向和单晶叶片，年产叶片 9 万件以上。之后，苏联也出现全自动的 ПМП-2 连续铸造定向炉 (图 20)，一台炉子每昼夜可生产 300~600 片叶片。另据报导，英国 R.R 公司 Derby 铸造分部拥有 17 台全自动的定向炉，仅由二人监控操作，年产量 35 万件，居世界之首。每台炉子都由一台计算机控制，而 17

表 3 波纹板厚度测量结果

试样名称	测量点数	厚度最小值 mm	厚度最大值 mm	厚度平均值 mm
箔带	6	0.084	0.088	0.086
波纹板	10	0.069	0.081	0.077

### 五、结 论

1. 采用超塑精密成形工艺研制成 TC4 钛合金双面波纹板 (80mm×200mm、200mm×200mm)。试验证明其工艺路线先进，模具和工装设计合理，并掌握了 TC4 钛合金波纹板制造工艺技术，压制出的 TC4 双面波纹板符合设计要求。

2. 采取多层复合式防护措施解决了钛合金箔带在高温成形中的表面层污染问题，保证了波纹板的质量。

3. 严格控制 TC4 钛合金带坯的冶金质量、冷轧变形程度和真空退火温度等，才能提供合格的 TC4 冷轧箔带。

#### 说 明

1. 参加波纹板超塑成形试验的有孙计生、张月仙等同志；
2. 研制钛合金箔带的有钢铁研究总院的李小玉、庞书忱和北京航空材料研究所付作义、王庆如等同志

对上述同志表示感谢。

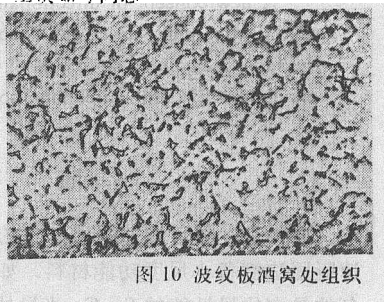


图 10 波纹板酒窝处组织 67×

台炉子又有一个中心控制机构。该公司不仅对熔化和浇注实行控制，而且其它工序 (如制壳、检测等) 也实行自动化。制壳时，涂料和撒砂全由机械手操作，壳型的干燥和焙烧由链带传动进行，叶片的加工也在无人操作的自动线上完成。产品无损检验时，只需将叶片放入 ARD ROX 公司制造的圆盘式自动检验仪中，就会自动报出有缺陷的叶片的缺陷形貌、位置和尺寸。R.R 公司还研究出快速测定叶片取向的仪器，用以监控叶片的结晶取向。据报导，Howmet 公司的欧洲铸造分部最近安装了一台新型定向凝固炉，用来生产大尺寸的地面涡轮零件。它的激冷板的直径为 20 英寸，可制造长达 18 英寸的零件。炉子容量为 25kg，它通过一台 Gould Modicon 844 微处理机控制生产过程，并用一台 Chesse 4001 记录器贮存有关数据。该炉子配置两台 125kW 的感应加热电源，用于加热壳型和熔化炉料。

自动化带来高质量，因而使总的成本降低。据称，R.R 公司的定向叶片成本已降到略低于普通精铸叶片的水平，而叶片的寿命却长得多。看来，电子计算机在定向凝固技术中的应用有着极其广阔的前景。

(续完)