

钛合金叠形波纹管的设计和制造<sup>\*</sup>

## Design and Manufacturing of TA15 Titanium Alloy V-Shaped Bellows

航天特种材料及工艺技术研究所 王斌 许沂 雷鹏

**[摘要]** 用有限元分析软件对叠形波纹管进行了结构设计,采用扩散连接方法和应力松弛技术制备了TA15钛合金叠形波纹管结构件。对高温扩散焊接叠形波纹管扩散连接界面微观组织、母材的晶粒度、材料的性能损失、气密性、刚度进行了分析和测试。结果表明采用扩散连接技术制备的叠形波纹管焊接接头良好,满足气密性、强度、刚度和疲劳性能要求。

**关键词:** TA15 钛合金 叠形波纹管 扩散连接

**[ABSTRACT]** TA15 titanium alloy V-shaped bellows is designed by finite element method and manufactured by diffusion bonding and stress relaxation technology. The microstructure of diffusion bonding interface, grain size of base metal, material performance loss, intensity and stiffness of high-temperature diffusion bonded V-shaped bellows are analyzed and tested. The results show that the weld joint is good and meets the requirement of intensity, strength, stiffness and fatigue property.

**Keywords:** TA15 titanium alloy V-shaped bellows Diffusion bonding

波纹管是复杂系统进行设计和结构补偿的关键部件之一,同时兼有减振降噪和密封功能,在航空航天、石油化工、水利电力、冶金和原子能部门都有应用。传统的U型波纹管采用不锈钢或高温合金液压胀形技术。钛合金由于曲强比高、回弹严重,不适合于冷成形,制备U型波纹管须在超塑成形温度下采用热成形,工艺十分复杂,壁厚均匀性不易控制;而叠形波纹管采用不锈钢或高温合金滚焊成形技术,这种结构疲劳强度低,焊缝质量难以控制。

本文采用扩散连接和应力松弛两步法制造钛合金叠形波纹管,该波纹管用于耐600~650℃高温部位,起柔性装配协调作用。采用扩散连接工艺可实现法兰和波纹管一次连接,工艺简单、模具成本低、可靠性高、成形精度高,克服了钛合金U型波纹管需解决高温密封、分瓣模具成本高、工艺复杂、壁厚均匀性不容易控制等缺点。而且采用扩散焊接工艺连接面积大,焊缝强度

高也克服滚焊成形波纹管强度和疲劳寿命低、密封性不好、不适合大变形等缺点<sup>[1-4]</sup>。

## 1 结构设计和分析

影响波纹管强度刚度最主要参数是波数 $n$ 和层数 $m$ ,对波纹管进行设计,首先应确定最佳波数和层数。波数越多刚度越低,其刚度和波数成反比关系。层数对刚度和强度影响更加明显,多层波纹管与尺寸相同的单层波纹管相比,刚度下降 $1/m^2$ ( $m$ 为层数)。因此,要确定波纹管设计结构以满足强度和刚度要求,在选定材料一定情况下,必须确定波数 $n$ 和层数 $m$ <sup>[5]</sup>。

本文设计的叠形波纹管为一种能够承受600~650℃高温的装配协调结构,根据温度使用环境选用TA15钛合金。波纹管的设计空间为外径200mm,内径120mm,高度不大于150mm;要求能够承受2000N轴向拉压力,变形量 $\pm 10$ mm;波纹管能够经受1.2MPa液压5min不发生泄漏。对于空间结构一定的叠形波纹管结构,波数 $n$ 、扩散连接宽度 $t_0$ (图1)影响强度和刚度。

根据设计要求采用有限元进行模拟分析,结果见图2,材料泊松比0.3、密度 $4.45\text{g/cm}^3$ 、弹性模量110GPa。

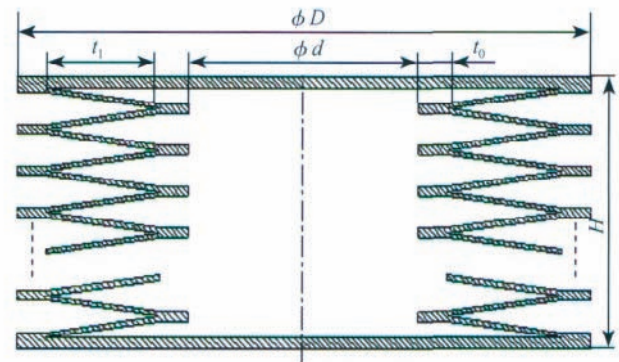


图1 叠形波纹管示意图

Fig.1 Diagram of V-shaped bellows

选用0.8mm厚退火轧制态TA15钛合金板材,将波纹管设计成单层,13波,扩散连接宽度为5mm,如图1所示。模拟计算结果得出波纹管的刚度值为140N/mm, von-mises最大应力值为85MPa,低于TA15钛合金的屈服强度,设计结构能够满足使用要求。

从模拟计算结果看出,应力集中部位在尖角处,如

<sup>\*</sup> 航天三院创新基金项目资助。

图3所示。该处应力虽远低于材料本身的屈服强度,但影响叠形波纹管疲劳寿命。为此,对尖角处进行钝化处理弱化应力集中提高疲劳寿命,如图4所示,对环形叠层板铣削处理,形成约0.1mm的圆角,扩散焊接后在两层板之间形成圆角,弱化应力集中。

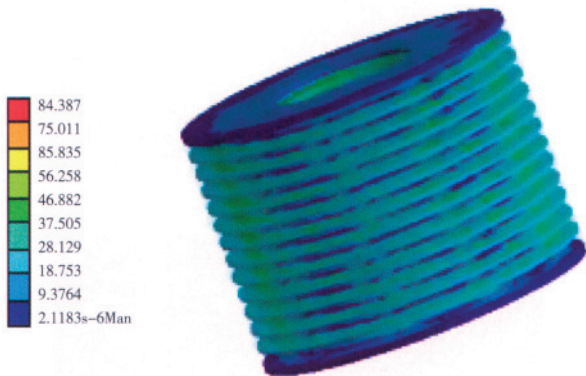


图2 叠形波纹管模拟分析结果  
Fig.2 Result by FEM method of V-shaped bellows

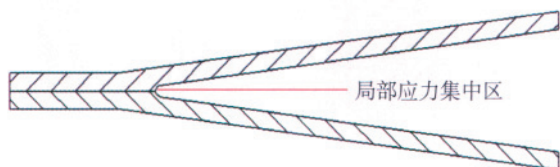


图3 可能存在应力集中部位  
Fig.3 Region of max-stress

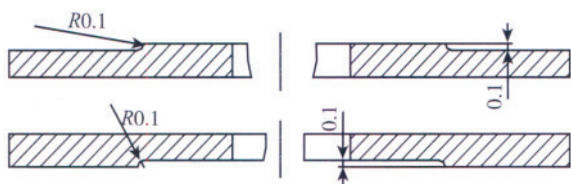


图4 应力集中弱化处理示意图  
Fig.4 Illustration of weakened region of max-stress

## 2 试验过程

叠形波纹管采用两步成形法,先扩散连接然后应力松弛。其工艺路线为:线切割下料→机械加工修圆角→表面酸洗处理→涂覆止焊剂→组装→进炉真空扩散焊接→扩散焊后车加工内外圆→应力松弛成形→波纹管多余物清理→波纹管结构最终精加工→几何尺寸及形位公差测量→常温液压试验→常温气密试验→刚度测试→产品最终几何尺寸和表面质量检查。

坯料设计成外径 202mm,内径 118mm 的圆环,内外径预留 2mm 的机械加工余量。为了便于后续试验分析,本试验中制备了随炉扩散焊接试片(图5)和随炉平板

试片。随炉焊接试片的形状、大小和叠层试片完全一样,由2片组成,真空扩散焊接时将这2层随炉试片叠放在上法兰上面,涂覆止焊剂避免和上法兰的扩散连接。随炉平板试片是为后续切割拉伸试样测定高温材料的性能损失,平板试片放入炉膛中和叠形波纹管经过同一个冷热循环。

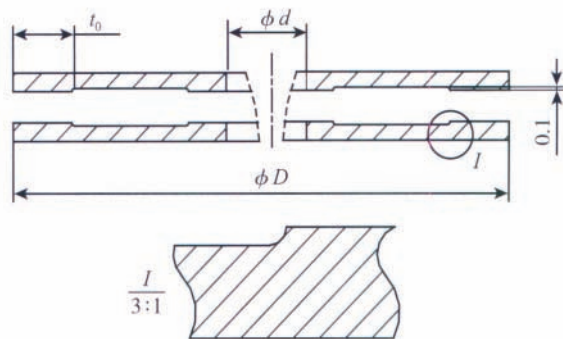


图5 扩散连接随炉试片  
Fig.5 Specimen for diffusion bonding

将铣好圆角的坯料酸洗处理,在无需扩散连接的地方涂覆止焊剂。止焊剂采用微米级陶瓷粉末(如氧化锆、氮化硼粉末)和有机溶剂配制而成。涂覆止焊剂必须控制厚度,太厚容易使扩散焊接面不容易压实,而太薄容易发生粘连,一般控制在0.1mm左右为宜。随后将26层0.8mm厚的单板(包含2片随炉试片)和上下法兰按顺序组装叠放(图6)放入VDW-200(P30/1600℃)型真空扩散焊接炉中,为方便脱模可在上下模具上涂覆石墨粉,将平板试片平放好后一起放入炉膛。真空扩散连接中主要涉及加热温度、刚性加载扩散连接压力和保压时间3个关键参数,对于TA15钛合金理想的扩散连接温度为(925±5)℃,加热到设定温度后,恒温1h,使模具受热均匀。随后压机启动缓慢加载压力,叠形波纹管扩散焊机的压力加载,相当于墩粗压力加载,本文中设计高径比小于1,缓慢加载不存在失稳现象,若要保证叠层之间既能有效扩散连接,又不至于因加载被

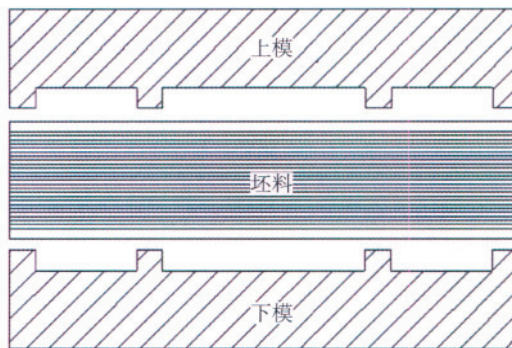


图6 进炉装配示意图  
Fig.6 Assembly diagram of die and cirque sheets

墩粗,加载压力必须精确控制。加载压力可根据扩散连接面积计算而得,一般取 TA15 在 925℃ 的变形抗力为 5~8MPa,根据扩散连接面积计算得到压力机加载力为 3t 左右。加载到最大压力后保压 90min,使叠片之间充分扩散,扩散连接时真空度保持在  $5 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$  Pa 之间,试验完成后随炉冷却。

将扩散连接后的试验件从真空炉中取出,对内圆和外圆以及两法兰端面进行机械加工,然后拉伸到所需要的长度后用等厚度垫片在叠层之间支撑,维持拉伸后的形状,放入真空炉中去应力退火,去应力退火的温度为  $(700 \pm 10)$ ℃,出炉后即可得到所需的叠形波纹管结构(图 7),若一次拉伸不到所需长度可多次拉伸多次进炉去应力退火。拉伸成形需设计专用工装,为保证成形后工件的形状精度及波距的均匀性,需在叠层之间设置约束。



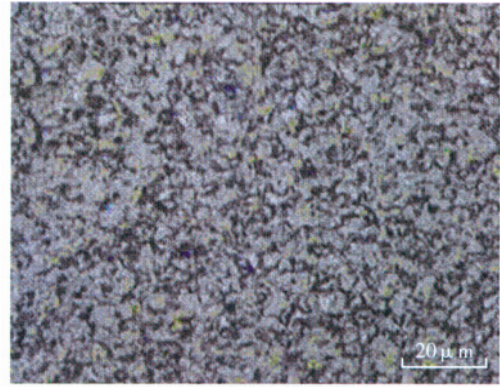
图7 叠形波纹管结构样件

Fig.7 Specimen of V-shaped bellows after diffusion bonding

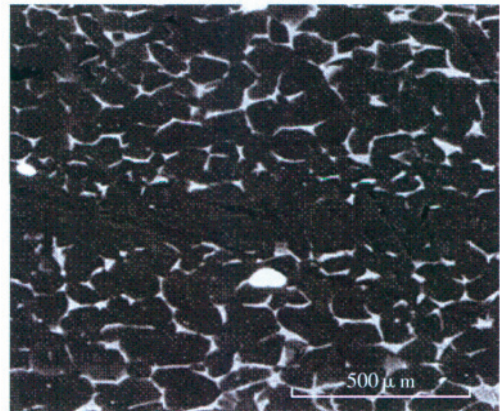
### 3 测试和分析

对随炉焊接试样的焊接区域进行超声扫描探伤,未发现焊接缺陷。从随炉试片圆周上每隔 60° 截取 1 个扩散连接分析试样,共 6 个试样,对扩散连接接头区域进行微观组织分析,图 8 (b) 为接头的微观组织照片,图中可看出明显的扩散连接区域和过渡层,扩散连接区域结合良好,没有发现未焊合区。图 8 (a) 为原始板材的微观组织形貌,原材料板材晶粒尺寸大约在  $2 \sim 5 \mu\text{m}$ ,经过高温扩散连接后基体的晶粒尺寸在  $10 \mu\text{m}$  左右,呈近似等轴状,晶粒和原始状态相比发生了粗化。晶粒的粗化主要是由于长时间高温发生再结晶和晶粒长大过程。

将随炉平板试样切割成标准拉伸试样进行性能测试(见表 1),由表 1 的数据可知,室温下板材初始的平均抗拉强度为 1042MPa,平均延伸率为 14.7%。经过高温扩散连接后强度下降到 962MPa,约为原始强度的



(a) 原材料板材



(b) 扩散连接界面

图8 原始组织和扩散焊接接头微观组织形貌

Fig.8 Microstructure of raw material and interface of diffusion bonding

92.3%,而延伸率下降到 7%,下降为原始板材的 50%。强度的降低和延伸率的下降主要是由于晶粒尺寸长大所致。扩散连接温度下,晶粒尺寸长大是必然现象,而晶粒尺寸除了和温度有关外,扩散连接时间也是主要影

表1 片状试样拉伸结果

状态	试验温度 $t/^\circ\text{C}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	平均抗拉 强度/MPa	断后延伸率 A/%	平均延 伸率/%
原始 状态	常温	1050	1042	14.0	14.7
		1050		15.0	
		1030		14.0	
		1040		14.5	
		1040		16.0	
扩散 连接后	常温	965	962	6.5	7
		965		6.5	
		965		6.0	
		950		7.0	
		965		9.0	

(下转第 65 页)

槽直接铸造出来,后续机加工只进行平台表面磨加工即可,一方面大大降低了机加工费用和制备周期,另一方面还拓宽了金属平台的材料选型,可以选用任意的金属材料进行平台制备。为了提高金属平台的服役寿命,钢铁研究总院选用性能更好的高温合金 K403 进行了热成形平台的制备,先后为北京航空制造工程研究所、沈飞集团制备了 3 套热成形金属平台,其中 RX-400 平台(见图 3)已连续服役 2.5 年左右,表现良好,平台未发生蠕变变形,其他 2 套平台也在正常服役当中。实践表明,由钢铁研究总院开发的该工艺是一种经济、快捷、比国外相关技术更加先进的热成形金属平台制备工艺。由于超塑成形金属平台在结构上与热成形平台类似,只是服役温度更高,而该制备工艺对平台所用材料无任何限制,因此,选择 MX246A 合金或 K403 合金作为平台用材,采用该新型的平台制备工艺完全可实现高质量超塑成形金属平台的制备。

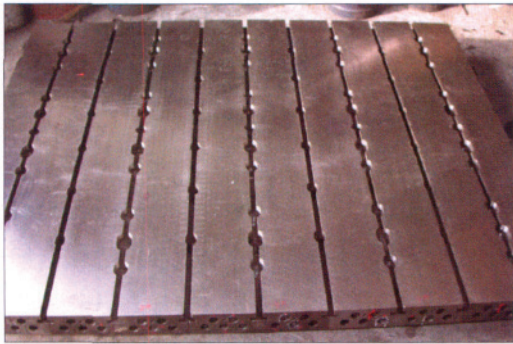


图3 钢铁研究总院研制的K403合金RX-400平台  
Fig.3 RX-400 hot forming flats made of K403 alloy produced by CISRI

### 3 结论

(1) 综合考虑钛合金热成形和超塑成形用金属平台的服役温度和受力情况,选择铸造高温合金或 Ni3Al 金属间化合物材料替代目前常用的耐热钢材料具有非常明显的优势,可保证平台长寿命稳定服役;

(2) 我国自主开发的新型特殊精密铸造工艺可将金属平台中的加热孔、测温孔和 T 形槽直接铸造出来,大大降低了平台的机加工难度和制备周期,且拓宽了金属平台的材料选型,是一种经济、快捷、比国外相关技术更加先进的热成形金属平台制备工艺;

(3) 钢铁研究总院制备的 K403 高温合金热成形平台服役表现良好,具备了生产钛合金热成形和超塑成形金属平台的能力。

### 参考文献

[1] 侯红亮,余肖放,曾元松. 国内航空钣金备技术现状与发展.

航空制造技术,2009(1):34-39.

[2] 陈先有,崔晶. 航空钛合金零件热成形及应用分析. 航空科学技术,2007(5):38-40.

[3] 郭和平,曾元松,韩秀全. 飞机钛合金整体结构的超塑成形/焊接组合工艺技术. 焊接,2008(11):41-45. (责编 小城)

(上接第 62 页)

响因素,因此在进行扩散连接时,必须寻求最佳连接温度和连接时间,使得材料的性能损失最小,这是工艺优化的关键。

对成形后的叠形波纹管进行密封性检测,将波纹管两端氩弧焊接成死结构,上下端面用工装固定避免打压时波纹管被拉长,然后打内压进行检测,叠形波纹管承受 1.5MPa 内压,保压 0.5h 未发生泄漏,波纹管的密封性满足使用要求。

对波纹管刚度测试,测试  $\pm 10\text{mm}$  变形量,波纹管刚度为 120N/mm 和理论计算值接近。

对波纹管的疲劳强度进行测试,在  $\pm 10\text{mm}$  变形条件下,振动频率 60 次/min,在 100 次循环周期内,叠形波纹管无任何损伤痕迹。

### 4 结论

采用扩散连接技术在  $(925 \pm 5)^\circ\text{C}$  范围,刚性加载 90min 能够实现 TA15 钛合金叠形波纹管制备,其扩散焊接接头良好,能够有效密封,但母材晶粒长大明显,性能损失较大,后续需要进一步优化扩散连接时间。

对成形样件进行刚度测试,其实测刚度值和理论计算值接近,表明用有限元模拟计算能够有效分析波纹管刚度值。采用扩散焊接技术制备的波纹管在有限的疲劳周期内能够满足使用要求。

经过  $(925 \pm 5)^\circ\text{C}$  高温扩散焊接后基体晶粒发生动态回复和再结晶,晶粒尺寸发生明显粗化,强度值降低幅度在 8% 左右,延伸率下降 50% 左右。由于钛合金经过高温后强度降低,进行结构设计时必须考虑适当提高安全系数。

### 参考文献

[1] 邹家生. 材料连接原理与工艺. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.

[2] Yao W, Wu A P, Zou G S, et al. Formation process of the bonding joint in Ti/Al diffusion bonding. Mater Sci Eng A, 2008: 480-456.

[3] Lee H S, Yoon J H, Yi Y M. Fabrication of titanium parts by massive diffusion bonding. J Mater Proc Techn, 2008: 201-280.

[4] Hefi L D. Innovations in the superplasticforming and diffusion bonded process. J Mater Eng Perform, 2008, 17:178.

[5] 李永生. 波形膨胀节实用技术. 北京:化学工业出版社, 2000. 32-33. (责编 晓立)