

# 钛合金的扩散焊连接技术

杨 瑞,朱雨生,高福洋

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所,河南 洛阳 471023)

**摘 要:** 本文介绍了扩散焊的原理、特点和主要扩散焊方法,对其在钛合金材料中的应用研究现状进行了综述,并对钛合金扩散连接的应用前景进行了展望。

**关键词:** 钛合金; 扩散焊; 应用前景

**中图分类号:** TG 146.2.3 **文献标识码:** A

## Diffusion Bonding for Titanium Alloy

YANG Rui, ZHU Yu-sheng, GAO Fu-yang

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** In this article, principle, characteristic and main methods of diffusion bonding are introduced. The application of diffusion bonding on titanium alloy is described including in fine works, bonding of titanium with different material and superplastic forming/diffusion bonding. The future of the diffusion bonding in titanium alloy is forecasted.

**Keywords:** titanium alloy; diffusion bonding; application prospects

钛合金具有比强度和比刚度高、耐腐蚀性好以及高温力学性能优良等优点,因而被广泛应用于航空、航天和其他工业领域。在一些钛合金复杂结构、薄壁精密结构的制造工艺中,由于扩散焊连接具有独特的优势而愈来愈受到重视,对钛合金的研究也逐渐成为扩散焊领域研究的热点之一。

本文通过介绍扩散焊的原理、特点和主要扩散焊方法,对其在钛合金材料中的应用研究现状进行了简介,重点介绍了其具有优势的三个应用方面:波纹管、钛合金与异种材料连接以及钛合金超塑成形/扩散连接,并对钛合金扩散连接的应用前景进行了展望。

## 1 扩散焊原理及特点

固态的扩散焊接是一种获得整体接头的方法,它是靠高温下材料表面的局部塑性变形使接触面之间紧贴来保障连接材料表层上的互扩散,因而产生了原子量级上的结合,便形成了整体的接头。

扩散焊是在可以控制的压力作用下,把处于

紧密接触状态的零件,加热到预定的温度并保温一定时间的过程。这些条件使两个需要连接的零件的表面产生塑性变形与达到最大程度的接近和原子的扩散,从而保证接头与基体材料的强度相同。

扩散焊具有一系列优点,不需要昂贵的钎料、焊条、熔剂和保护气体;此外,也不需要焊后机械加工,因为没有氧化皮、焊渣和焊瘤,从而消除了昂贵金属的损失;不会增加构件的质量,这一点是其他形式的焊接、钎焊和胶接所无法避免的;零件不会发生翘曲以及连接区的金属性能不会发生变化<sup>[1]</sup>。

真空扩散焊是获得与基底金属等强度的钛及其合金接头的有效方法之一。首先,零件的形状及尺寸大小允许应用此方法;其次,允许在接头的周围形成真空和施加压力以保证焊接表面间的紧密接触。

扩散焊与熔化焊的不同之处在于:扩散焊时,连接材料的表面并不熔化,因为焊接温度低于基体金属的熔化温度。它与钎焊的区别在于,

收稿日期: 2013-06-03

作者简介: 杨瑞,女,工程师。E-mail: fine2002@126.com。

熔化了中间夹层,在扩散的过程中,完全弥散到被焊接的基体材料中去了。

## 2 主要扩散焊方法

### 2.1 常规扩散焊(DB)

通过加热加压使得材料扩散达到原子间结合的方法,其加热温度一般远低于焊接材料的熔点,所以材料的变形和损失较少,最大限度的保证了材料的尺寸质量。根据扩散焊两材料间是否生成脆性相,将常规扩散焊分为两大类:

#### (1) 不加中间层

由于不发生反应,无脆性相生成,所以接头材料可以自由扩散从而实现良好的结合。该方法的重点在于扩散连接时温度、压力和时间的控制。在同种及不同材料的钛合金之间扩散焊时,通过制定合适的焊接工艺,该方法往往可以获得质量优良的焊接接头。

#### (2) 夹中间层

由于钛可以和很多金属反应生成脆性的金属间化合物,所以大多情况下需要添加中间材料。添加中间层一般要求可以防止形成脆性相的元素相互扩散,同时其自身又不与两侧材料生成脆性相,而且还要能与两侧材料实现良好的扩散结合。所以对于该方法中间层的设计就是决定焊接质量优劣的决定环节。

### 2.2 液相界面扩散焊(LID)

也称扩散钎焊,所采用的时间、温度和焊前清理工艺于扩散焊非常接近,只是压力要小得多,只要能使焊件相互接触便可。连接面上常常镀铜、镀镍或者加上一层厚0.005~0.03 mm的铜或镍箔作为过渡层。当加热到900~950℃,铜与钛发生反应,在接头连接面上形成熔融的共晶体,该液相能润湿钛,并像一般钎焊一样填满接头间隙。焊件在该温度下至少保持1.5 h。在1~4 h保温过程中,共晶液体与基体金属之间继续扩散,改变成分而固化。但由于铜扩散到钛合金中,容易在接头中形成魏氏组织。

### 2.3 瞬间液相扩散焊(TLP)

采用化学成分与钛合金基体相近但熔化温度较低的中间层合金,在连接温度中间层合金发生熔化,并在连接面间形成液态薄膜。随后保温过程中,中间层合金与基体金属之间发生快速凝

固。继续保温,接头组织进一步均匀化,最终获得力学性能接近于基体金属的接头。焊接温度对接头性能影响最大,其次是接头间隙,而扩散时间的影响较小。

### 2.4 超塑成形/扩散连接技术(SPF/DB)

扩散焊主要是超塑性流动过程,同类材料的最佳扩散焊接温度通常在最佳超塑性成形(SPF)温度附近,不同钛合金之间的扩散焊,由于相转变温度的差别,情况比较复杂。在两被焊材料的最佳SPF温度之间,通常可以获得较好的焊接质量。因此,超塑性成形与扩散焊两工艺过程合并到一个工序的新工艺,可以节约成本80%左右,材料利用率也大大提高。钛合金超塑成形/扩散连接技术一般是在一次热循环中完成超塑成形和扩散连接两道工序。这种只需一次加热过程的超塑成形/扩散连接工艺常见于板料的吹胀成形和扩散连接,具体实施两道工序亦有先后顺序,一般是先进行扩散连接然后再进行超塑成形<sup>[2-5]</sup>。

## 3 国内外研究现状

国内外学者针对钛合金以及钛合金和异种材料的扩散焊连接进行了广泛的研究。Tuppen等<sup>[6]</sup>研究了不同钛合金Ti-6Al-4V和Ti500之间的扩散连接工艺,对连接接头的能谱(EDX)分析表明,化学元素在接头部位的扩散区域位于距离连接界面2 μm范围内。Calvo等<sup>[7]</sup>研究了Ti-6Al-4V合金在连接温度为850℃时的扩散连接工艺。结果表明,高质量的Ti-6Al-4V合金连接接头可以在温度850℃,压力4 MPa,时间90~120 min范围内获得。Liu等<sup>[8]</sup>研究了TC21合金扩散连接接头的微观组织、界面结合质量、显微硬度和压缩变形率随连接工艺参数的变化规律,结果表明,连接温度的提高及连接时间的延长分别导致扩散系数的增大和扩散程度的增加,同时变形能力增大,因而界面焊合率提高,但接头变形率增大;接头显微硬度随连接温度的升高而明显提高,但随连接时间的变化存在峰值。在880~930℃条件下连接能够得到等轴组织,温度越高α相和β相晶粒尺寸越大;当温度高于980℃时,组织演变为片层状;温度为880℃时,随着连接时间的增加α和β相组织逐渐变大。杨勇等<sup>[9]</sup>对不同晶粒度的TC21合金在不同温度、压

力和时间下的扩散连接进行了研究,结果表明,TC21 合金扩散连接过程中,元素沿晶界扩散,晶粒越细小,扩散效果越好,结合率越高。沈俊军<sup>[10]</sup>在研究两种不同晶粒尺寸(2  $\mu\text{m}$  和 18  $\mu\text{m}$ )的 TC4 合金扩散连接实验中也得到类似结果。同样连接条件下,TC4 合金晶粒尺寸越小,界面空洞闭合越快,界面结合率越高。而且不同晶粒尺寸的钛合金,连接工艺参数(温度、压力和时间)对界面组织特征的影响不尽相同。黄刚华<sup>[11]</sup>采用连接温度 900  $^{\circ}\text{C}$ ,连接时间 60 min 的条件,研究了 0.75 ~ 3.0 MPa 不同连接压力对 TC4 合金扩散连接接头的影响,结果表明,较大的连接压力有利于接头处空洞的闭合及结合率的提高;其他工艺条件不变的情况下,压力的增加会产生再结晶晶粒变小的效应。王国峰等<sup>[12]</sup>研究发现,800  $^{\circ}\text{C}$ 、850  $^{\circ}\text{C}$ 、900  $^{\circ}\text{C}$  扩散连接的 TB<sub>2</sub> 合金剪切试样沿焊合区域开裂,800 ~ 900  $^{\circ}\text{C}$  时随连接温度升高, TB<sub>2</sub> 合金接头强度值也随之升高,在 900  $^{\circ}\text{C}$  时接头的强度最高,此后随温度升高,剪切强度反而降低。Kurt 等<sup>[13]</sup>研究了不同连接温度对 Ti-6Al-4V 与铁素体不锈钢扩散连接界面组织的影响,其采用的连接时间为 30 min,连接压力为 10 MPa。实验得到了无微观空洞和缺陷的接头,结合区形成了 FeTi 和 Fe<sub>2</sub>Ti 两种中间相。Yao 等<sup>[14]</sup>以工业纯钛 TA2 和工业纯铝 L4 为连接对象研究了扩散连接中的塑性变形条件对接头性能的影响,结果表明,在一定的接头塑性变形率范围内,变形率大的试样,其扩散连接接头强度较高。He 等<sup>[15]</sup>在连接压力为 3 MPa 条件下对 Ti-2.5Al-2.5Mo-2.5Zr 合金和 Co-Cr-Mo 合金进行了固态扩散连接。在实验工艺参数范围内,温度 850  $^{\circ}\text{C}$ 、时间 60 min 时获得高强度连接接头;低于该温度时,原子扩散不明显,导致接头质量较差;高于该温度时,在扩散区域形成的金属间化合物显著降低了接头强度。

钛合金在实际应用中会和其他材料连接,从而发挥两者的优势,其中应用最广的就是钛合金与不锈钢。但是钛合金与不锈钢直接扩散焊,会在结合面附近形成一个金属间化合物和碳化物的薄层,导致接头脆断。由于镍能与铁无限互溶,且镍具有良好的高温塑性,可以缓释接头残余应力<sup>[16]</sup>,所以常被选作扩散焊接不锈钢与其

他金属的中间层材料<sup>[17]</sup>。Kundu S 等人<sup>[18]</sup>采用 300  $\mu\text{m}$  厚 Ni 箔作为中间层成功扩散焊接纯钛与 304(O<sub>Cr</sub>18Ni9) 不锈钢。然而,由于镍和钛之间的互扩散能力强,在高温和长时间焊接条件下,镍、钛交界面上会生成诸多 Ti、Ni 金属间化合物,从而影响接头质量。采用 V + Cu 复合夹层,可有效防止 Ti 与不锈钢中 Fe、Cr、Ni、C 的相互扩散和迁移,消除接头中脆性的金属间化合物和碳化物。铜是非碳化物形成元素,它能阻止碳向钛中扩散,并对钛有一定的溶解度。同时,铜的良好塑性有助于界面紧密接触,而且,铜与钛合金、与不锈钢均可通过扩散焊实现连接。但铜和钛合金的相互扩散距离较长,在交界面附近易形成由固溶体、金属间化合物和共晶体组成的多层次过渡组织,它是造成接头沿钛合金与铜的界面发生断裂的主要原因<sup>[19]</sup>。钒是唯一与钛、铁都能形成固溶体,而不形成金属间化合物的金属元素,但它与不锈钢中的镍、碳等元素易形成硬脆的 VNi 和 VC。采用 V 作中间层时,为了防止镍、碳向钒中扩散,需在钒与不锈钢之间再添过渡金属,由于铜既不与碳作用,同时,与钒及与不锈钢中的各元素均只形成固溶体,不形成金属间化合物,因此,Cu 可实现 V 与不锈钢的隔离。基于上述原理,孙荣禄等<sup>[20]</sup>进行了 V + Cu 作为中间层的研究,结果表明,V + Cu 复合中间层有效地防止了钛与不锈钢中元素的互扩散,消除了接头中的脆性金属间化合物和碳化物,因此,接头强度大幅度提高(最高达 537 MPa)。

## 4 钛合金扩散连接技术应用

钛合金扩散连接一般在真空条件下进行,虽然钛合金表面有一层致密的氧化膜,但经过适当清理,在高温、真空的条件下其表面的氧化膜很容易溶入母材中,不会妨碍扩散连接的顺利进行,可以保证焊后良好的尺寸精度,避免二次加工。

### 4.1 波纹管

钛合金波纹管用于耐 600 ~ 650  $^{\circ}\text{C}$  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、可靠性好、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,也克服了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。其连接效果如图1所示。采用扩散连接技术在(925±5)℃范围内,刚性加载90 min能够实现Ti15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,对成形样件进行刚度测试,其实测刚度值满足设计要求,而且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<sup>[21]</sup>。

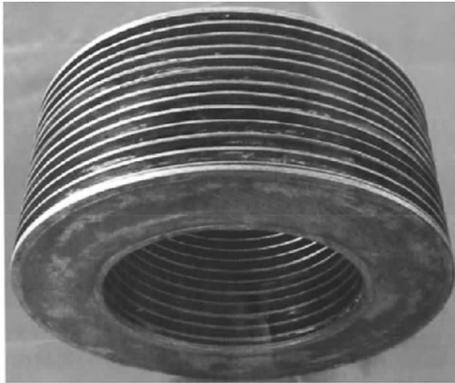


图1 叠形波纹管结构样件<sup>[21]</sup>

Fig. 1 Specimen of V-shaped bellows after diffusion bonding

#### 4.2 钛合金与异种材料连接

实际生产中不锈钢和钛合金异径转接管可以通过扩散焊取得良好的连接效果,其结构如图2所示<sup>[22]</sup>。在俄罗斯的特种机器制造业中,采用了一系列钛合金来制造不锈钢与钛合金异径转接管。为了降低制造成本,提高双金属异径转接管制造的工艺性,俄罗斯学者提出了真空扩散焊接,并研究了外径为10~150 mm管道的转接管的真空扩散焊工艺。通过对不锈钢与钛合金异径转接管扩散焊接的试验与研究,制订了成熟的不锈钢与钛合金转接管扩散焊接工艺相关的技术指南文件,从而扩大了真空扩散焊在异种金属连接中的应用<sup>[22]</sup>。

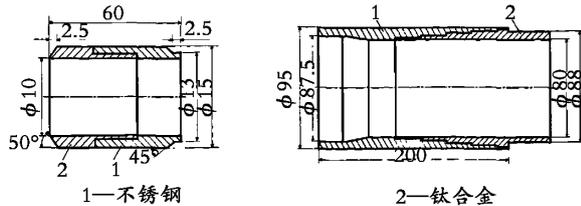


图2 不锈钢管和钛合金管转接管结构示意图<sup>[22]</sup>

Fig. 2 Transfer tube structure diagram of stainless steel tube and titanium alloy tube<sup>[22]</sup>

#### 4.3 钛合金超塑成形/扩散连接

20世纪70年代,美国洛克威尔公司首先将超塑成形和扩散连接技术相结合,开发了超塑成形/扩散连接技术。之后,英、法、德、前苏联和日本都相继开展了这一技术研究,这种技术非常适合于加工复杂形状的零件,例如航空发动机上的风扇叶片、飞机机翼等。至今,超塑成形/扩散连接技术已广泛应用于航空航天领域并取得了显著的技术经济效益<sup>[23]</sup>。

我国超塑成形/扩散连接技术研究起步较晚,开始于20世纪70年代末,至今已先后完成了基础工艺试验、典型构件研制、模具选材试验、性能测试、质量控制与检测等方面的工作,成功研制出某飞机风动泵舱门、隔框、电瓶箱罩盖、发动机维护舱盖、干扰弹导筒等航空零件,并在超塑成形/扩散连接的数值模拟等方面取得了一系列重要研究成果。我国自行研制的钛合金装机结构件的应用实例见表1<sup>[24]</sup>。

表1 我国钛合金超塑成形/扩散连接件的应用<sup>[24]</sup>

Table 1 The structural components manufactured by SPF/DB in China<sup>[24]</sup>

| 构件名称        | 结构特点  | 主要经济指标             |
|-------------|---|--------------------|
| 某机框锻件       | 超塑成形/扩散连接工艺代替热成形工艺                                | 减重 8.8% ,降低成本 47%  |
| 某机舱门        | 超塑成形/扩散连接件代替铆接件,零件数由 52 减至 22 ,紧固件从 840 个减至 103 个 | 减重 15% ,降低成本 53%   |
| 某机电瓶罩       | 钛合金超塑成形/扩散连接件代替不锈钢件                               | 减重 47% ,降低成本 50%   |
| 某新型发动机维护口盖  | 钛合金超塑成形/扩散连接件代替铝合金铆接件                             | 减重 20.5% ,降低成本 55% |
| 某机整段框(主承力框) | 框分为 6 段,全部用超塑成形/扩散连接件                             | 减重 12% ,降低成本 30%   |

国内外的研究均表明,用超塑成形/扩散连接技术生产飞行器结构件,与常规方法相比,可使结构质量降低 30%,成本降低 40%~50%。

图 3 所示为 F-15 型飞机的原装配式龙骨结构件<sup>[25]</sup>,上有 75 个零件,1 420 个铆钉,需十几套模具,两套装配夹具,后改用超塑成形/扩散连接结构件,只需 4 个零件、71 个连接件,两套模具,无需夹具。整个结构质量减轻 25%,总成本降低 77%,其中工具成本降低 16%。图 4 所示的是 F-15 型飞机机身背部两块大型壁板<sup>[26]</sup>,长 3 048 mm,宽 1 143 mm。原结构由蒙皮、隔框、桁条组成,现改用超塑成形/扩散连接结构,只需 4 块超塑成形/扩散连接壁板,减少 9 个隔框、10 根桁条、150 个零件和 5 000 个铆钉,总质量减轻 38.4%,总成本降低 53.4%。图 5 为超塑成形/扩散连接技术在“狂风”战斗机上的典型应用<sup>[26]</sup>。

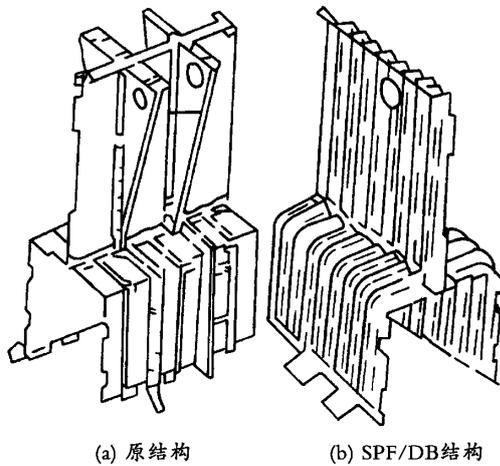


图 3 F-15 飞机龙骨复板与现行用龙骨的比较<sup>[25]</sup>  
Fig. 3 The comparison of F-15 keels made by SPF/DB to the present type<sup>[25]</sup>

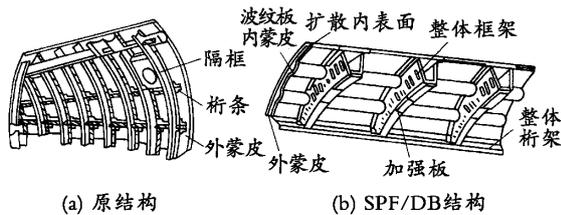


图 4 F-15 后机身壁板与原装配式壁板的比较<sup>[26]</sup>  
Fig. 4 The comparison of F-15 wall panels made by SPF/DB to the original type<sup>[26]</sup>

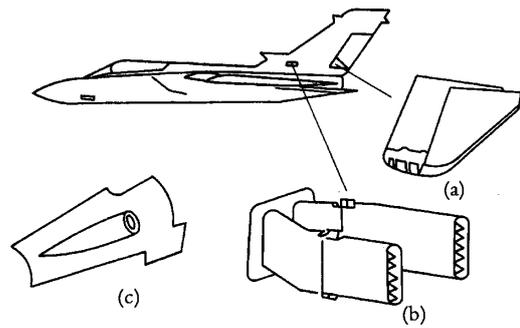


图 5 “狂风”多用途战斗机上的 SPF/DB 构件<sup>[26]</sup>: (a) 发动机控制装置的整流罩; (b) 热交换器排气管; (c) 机炮火焰口的防护罩  
Fig. 5 The SPF/DB components in “gustiness” fighter plane<sup>[26]</sup>

## 5 展望

我国是一个制造大国,扩散焊连接技术的研究、开发、应用以及产业化对国民经济发展具有现实的重要意义。随着扩散连接技术的不断发展和完善,其发展空间会得到进一步的拓展,在精细零件的连接和异种材料的连接领域中具有广阔的应用前景,尤其是与超塑性相结合,使得扩散焊技术能够推动制造业更好更快的发展,在不久的将来必将迎来快速发展和应用的高峰。

### 参考文献:

- [1] 史耀武 主编. 中国材料工程大典,第 22 卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
Shi Y W. China Materials Engineering Canon, ( Vol 22) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [2] Hefti L D. Advances in fabricating superplastically formed and diffusion bonded components for aerospace structures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance. 2004, 13( 6) : 678—682.
- [3] Martin R, Evans D. Reducing costs in aircraft: the metals affordability initiative consortium [J]. JOM, 2000, 52( 3) : 24—28.
- [4] Mugarra A, Ostolaza K, Alcaraz J L. Validation of In718 SPF and DB processes for the design of aircraft engine parts[J]. Journal of Materials Processing and Technology, 2002, 125-126: 549—554.
- [5] 侯冠群. 宽弦空心风扇叶片制造工艺的发展[J]. 航空制造工程, 1994( 5) : 6—8.  
Hou G Q. Development of fabrication technology of

- Wide-chord hollow fan blade [J]. *Aeronautical Manufacturing Engineering*, 1994 (5): 6—8.
- [6] Tuppen S J, Bache M R, Voice W E. A fatigue assessment of dissimilar titanium alloy diffusion bonds [J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27: 651—658.
- [7] Calvo F A, Gómez De Salazar J M, Urena A, *et al.* Diffusion bonding of Ti-6Al-4V alloy at low temperature: metallurgical aspects [J]. *Journal of Materials Science*, 1992, 27(2): 391—398.
- [8] Liu H J, Feng X L. Study of diffusion bonding of fine grain TC21 titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(9): 1509—1513.
- [9] 杨勇, 周文龙, 陈国清, 等. 细晶 TC21 合金超塑性扩散连接的研究 [J]. *制造技术研究*, 2009(3): 8—13.  
Yang Y, Zhou W L, Chen G Q, *et al.* Investigation on superplastic diffusion bonding of fine-grained TC21 alloy [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2009(3): 8—13.
- [10] 沈俊军. TC4 钛合金扩散连接界面特征及孔洞闭合数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2007.  
Shen J J. TC4 titanium alloy diffusion bonded interface characters and simulation of the void shrinkage [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [11] 黄刚华. 钛合金超塑性成形/扩散连接的数值模拟及工艺研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2009.  
Huang G H. Simulation and research of superplastic forming diffusion bonding technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [12] 王国峰, 张凯锋, 吴为. TB2 钛合金扩散连接与分形维数 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(5): 982—986.  
Wang G F, Zhang K F, Wu W. Diffusion welding of TB2 titanium alloy and fractal dimension [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(5): 982—986.
- [13] Kurt B, Orhan N, Evin E, *et al.* Diffusion bonding between Ti-6Al-4V alloy and ferritic stainless steel [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(8-9): 1747—1750.
- [14] Yao W, Wu A P, Zou G S, *et al.* Formation process of the bonding joint in Ti/Al diffusion bonding [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 480(1-2): 456—463.
- [15] He G, Liu H H, Tan Q B, *et al.* Diffusion bonding of Ti-2.5Al-2.5Mo-2.5Zr and Co-Cr-Mo alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509: 7324—7329.
- [16] 鲍利索娃 E A, 陈石卿译. 钛合金金相学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1986: 194.  
Борисова Е. А. Titanium Alloy Metallography. Beijing: National Defence Industry Press, 1986: 194.
- [17] 伍光凤, 盛光敏. 钛合金和不锈钢的扩散焊接研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2007, 36(3): 86—89.  
Wu G F, Sheng G M. Research Progress in diffusion bonding of titanium alloy and stainless steel [J]. *Hot Working Technology*, 2007, 36(3): 86—89.
- [18] Kundu S, Chatterjee S. Interfacial microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded titanium-stainless steel joints using a nickel interlayer [J]. *Materials Science and Engineering (A)*, 2006, 425(1-2): 107—113.
- [19] 孙荣禄, 扬文杰, 于斌. 钛合金与不锈钢扩散焊中间金属的选择 [J]. *新材料新工艺*, 1997(5): 15—18.  
Sun R L, Yang W J, Yu B. Transition metal of diffusion bonding between Ti and stainless steel [J]. *New materials and technology*, 1997(5): 15—18.
- [20] 孙荣禄, 张九海, 黄喜东. 中间过渡金属 V + Cu 对钛合金与不锈钢扩散焊接头性能的影响 [J]. *焊接*, 1997, 41(2): 2—6.  
Sun R L, Zhang J H, Huang X D. Influence of transition metal V + Cu on properties of diffusion bonding of Ti and stainless steel [J]. *Welding and Joining*, 1997, 41(2): 2—6.
- [21] 王斌, 许沂, 雷鹏. 钛合金叠形波纹管的设计和制造 [J]. *航空制造技术*, 2011, 16: 60—65.  
Wang B, Xu Y, Lei P. Design and manufacturing of TA15 titanium alloy V-shaped bellows [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011, 16: 60—65.
- [22] 许贵芝. 不锈钢与钛合金异径转接管的焊接 [J]. *焊管*, 2009, 32(11): 70—72.  
Xu G Z. Welding between stainless steel and titanium alloy different diameter transfer tube [J]. *Welded Pipe and Tube*, 2009, 32(11): 70—72.
- [23] 王向民, 乔宦文. 钛合金 SPF/DB 技术在航空工业中的应用 [J]. *钛工业进展*, 1998(1): 8—11.  
Wang X M, Qiao H W. The application of titanium alloy SPF/DB using in aeronautical industry [J]. Ti-

- tanium Industry Progress. 1998 ( 1) : 8—11.
- [24] 李志强, 郭和平. 超塑成形/扩散连接技术应用与发展现状 [J]. 航空制造技术, 2004( 11) : 50—52.  
Li Z Q, Guo H P. Application and development of superplastic forming diffusion bonding technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology. 2004 ( 11) : 50—52.
- [25] 于卫新, 李森泉, 胡一曲. 材料超塑性及超塑成形/扩散连接技术及应用 [J]. 材料导报, 2009, 23 ( 6) : 8—14.
- Yu W X, Li M Q, Hu Y Q. Superplasticity and application of superplastic forming diffusion bonding technology [J]. Materials Review, 2009, 23 ( 6) : 8—14.
- [26] 文九巴, 杨蕴林, 杨永顺, 等. 超塑性应用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
Wen J B, Ynag Y L, Yang Y S, *et al.* Superplastic application technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

( 编辑: 房威)