

中间层厚度对 P/M TC4 - GCr15 扩散焊接头强度的影响

郎泽保 吕宏军 王亮

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 采用不同厚度的电镀镍作为中间层,在 900℃、4 h 和 150 MPa 压力的热等静压条件下,使用 TC4 预合金粉末和 GCr15 轴承钢制备了钛钢扩散焊接头。利用光学显微镜、扫描电镜、XRD 和机械拉伸对接头进行了测试和分析。结果表明:当没有添加中间层时,接头的强度达到了 564 MPa;当添加了中间层且中间层的厚度为 150 μm 时,接头的强度最高,为 502 MPa。中间层过厚或者过薄,都会导致接头强度的下降。

关键词 中间层厚度,接头强度,热等静压扩散焊,粉末钛合金 TC4,GCr15 轴承钢

Influence of Interlayer's Thickness on Strength of HIP Diffusion Bonding Joints Between P/M TC4 Alloy and GCr15 Bearing Steel

Lang Zebao¹ Lü Hongjun¹ Wang Liang¹

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract By using electroplated nickel of different thickness as interlayer, diffusion bonding joints between titanium alloy and bearing steel were produced under HIP condition with TC4 prealloyed powders and bearing steel GCr15 at 900 °C and under 150 MPa for 4 h. The gained joints were tested and evaluated by optical microscopy, scanning electronmicroscopy, XRD and tensile testing. The results show that the tensile strength of the joint without interlayer can reach 564 MPa. However, by using pure nickel as interlayer, the max tensile strength of 502 MPa, is obtained by testing the joints with the interlayer's thickness of 150 μm. Oversize or undersize thickness of the interlayer will reduce the level of tensile strength.

Key words Interlayer's thickness, Tensile strength of joint, HIP diffusion bonding, P/M titanium alloy TC4, Bearing steel GCr15

0 引言

钛合金具有质量轻、耐腐蚀等特点,而轴承钢在淬火处理后具有硬度高、耐磨等特点。由钛合金和轴承钢构成的双金属复合结构件同时具有两者的性能,因此在航天领域的转动机构或摆动机构上具有一定的用途。钛合金和轴承钢直接焊接得到的双金属复合结构件连接强度很低,无法进行工程应用。因为钛钢之间相互扩散,会在界面处形成较脆的 TiFe、TiFe₂、TiCr₂ 等金属间化合物,导致钛钢复合结构件在界面处发生断裂^[1~3]。

解决此问题的方法一般是在钛合金和轴承钢之间设置中间层,防止 Ti 原子和 Fe 原子直接接触,在焊缝处形成较脆的 Ti - Fe 系金属间化合物^[4~5]。常用的中间层是纯 Ni,因为 Ni 抗腐蚀性能较好,而且

和 Fe 无限固溶,所以 Ni - Fe 之间不会形成金属间化合物,但是在 500℃ 左右 Ni - Cr 可以形成一种有次序的化合物。Ni - Ti 之间根据彼此的含量不同会形成多种的 Ni - Ti 基金属间化合物^[6],但相比 Fe - Ti 形成的金属间化合物, Ni - Ti 形成的金属间化合物具有更好的延性^[7]。

钛钢复合结构件的接头强度不仅取决于焊接界面处形成的生成物种类,而且还取决于焊接界面处的微观结构,如界面的形状等。由于粉末冶金技术制备的钛合金综合性能较好,并可以近净成型,而热等静压技术能够同时实现粉末的烧结和原子的相互扩散^[8]。本文利用热等静压技术进行了 TC4 预合金粉末和 GCr15 轴承钢的扩散连接,制备了 P/M TC4 - GCr15 热等静压扩散焊接头,并重点研究了中间层金

收稿日期:2008 - 12 - 03;修回日期:2009 - 02 - 20

作者简介:郎泽保,1975 年出生,工程师,主要从事粉末钛合金、异种双金属扩散焊的研究工作。E - mail: lzb0413@sina. com. cn

属纯 Ni 的厚度对 TC4 - GCr5 接头强度的影响。

1 试验

1.1 原料

TC4 预合金粉末和轴承钢 GCr15 的化学成分如表 1 所示。将 GCr15 加工成 $\Phi 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的圆片,然后在圆片的表面进行电镀镍作为中间层,镍层的厚度分别为 0、30、60、90、120、150、180 及 210 μm 。

表 1 基体材料的化学成分

Tab.1 Chemical contents of basic materials

材料	% (质量分数)								
	Al	V	Fe	Ti	Cr	Ni	C	H	O
TC4 粉末	6.62	3.73	0.094	余			0.045	0.001	0.18
GCr15			余		1.44	0.04	1.00		

1.2 设备与仪器

热等静压机型号为 QIH-32。接头的强度、金相观测、断口扫描和 X 衍射分别在万能拉伸实验机、Leica DMRM 金相显微镜、EVO 60 扫描电镜和 Y-2000 型全自动 X 衍射仪完成。

1.3 扩散焊工艺

P/M TC4 - GCr15 扩散焊接头是通过热等静压 TC4 预合金粉末和轴承钢 GCr15 制备的。Wang Liang 和 F. H. Froes 的研究表明 TC4 预合金粉末的热等静压烧结温度为 900 ~ 950 $^{\circ}\text{C}$ ^[9~10],而钛钢的扩散焊温度为 800 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$ 。试验采用的工艺参数为: 900 $^{\circ}\text{C}$, $\geq 150 \text{ MPa}/4 \text{ h}$ 。

2 结果与讨论

2.1 接头的抗拉强度

P/M TC4 - GCr15 扩散焊接头的抗拉强度见图 1。可以看出,当无中间层时,其强度为 564 MPa;当中间层(纯 Ni)的厚度为 30 ~ 150 μm 时,其强度随中间层厚度的增加而提高,从 420 MPa 增加到 502 MPa;当中间

层的厚度在 150 ~ 210 μm 时,接头的抗拉强度随着中间层厚度的增加而下降。

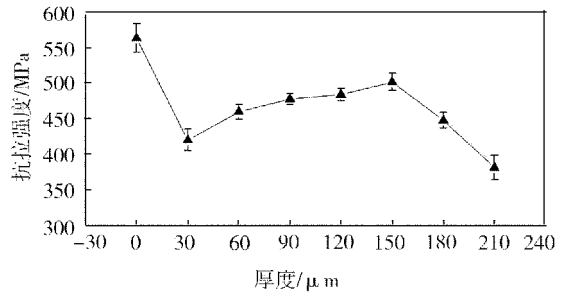


图 1 中间层厚度与 P/M TC4 - GCr15 扩散焊接头抗拉强度的关系

Fig.1 Relationship between interlayer's thickness and tensile strength of P/M TC4-GCr15 diffusion bonding joints

2.2 接头的金相组织

图 2 为接头的金相结构。图 2(a) 中 P/M TC4 - GCr15 的界面处发生了扩散,形成了狭窄的灰色扩散区域。在热等静压过程中,GCr15 基体在 TC4 预合金粉末颗粒的挤压下发生变形,在钛 - 钢交界处形成了由许多球面组成的结合面,增加了钛钢焊接处的接触面积,导致 P/M TC4 基体和 GCr15 基体相互咬合,在钛 - 钢界面处形成了“机械锁扣”,从而增加了 TC4 预合金粉末和 GCr15 基体之间的结合力。形成的原因在于在热等静压过程中,钛合金 TC4 预合金粉末在 850 $^{\circ}\text{C}$ 作用,压力在 100 MPa 左右仍能够大致保持原来的球型^[11],而 GCr15 在 850 $^{\circ}\text{C}$ 时的屈服强度为 63 MPa^[12]。在外力的作用下,钛合金 TC4 预合金粉末在 GCr15 轴承钢表面挤压出很多的球面。在冷却到室温后就形成了这种由多个球面形成的焊接界面。

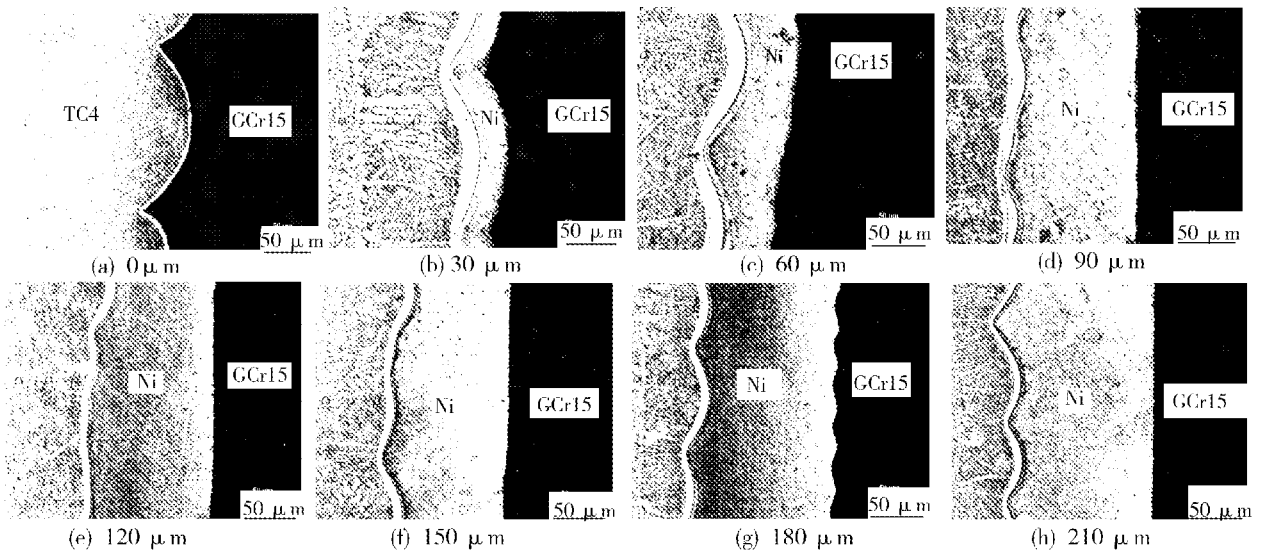


图 2 不同厚度中间层金属的 P/M TC4 - GCr15 扩散焊接头的金相照片

Fig.2 Optical micrographs of P/M TC4 - GCr15 diffusion bonding joints with interlayer of different thickness

在图 2(b) ~ (h) 中, 由于中间层的缓冲作用, TC4 预合金粉末与 GCr15 之间的相互作用不如图 2(a) 明显。虽然 TC4 预合金粉末也在 TC4 - Ni 界面上形成了曲线球面, 但比图 2(a) 平缓。在热等静压过程中, TC4 - Ni 和 GCr15 - Ni 的两个界面都发生了元素扩散。可以看出, 在 GCr15 - Ni 界面形成的扩散

带呈深黑色, 宽度较窄; 在 TC4 - Ni 界面处形成的扩散带较复杂。紧接着 Ni 基体的是一条深色的扩散带, 然后是一条亮白色的区域, 靠近 TC4 基体的是一种呈现针状的结构, 即韦德曼 $\alpha - \beta$ 结构^[13]。

2.3 接头断口形貌和分析

拉伸试棒的断口形貌如图 3 所示。

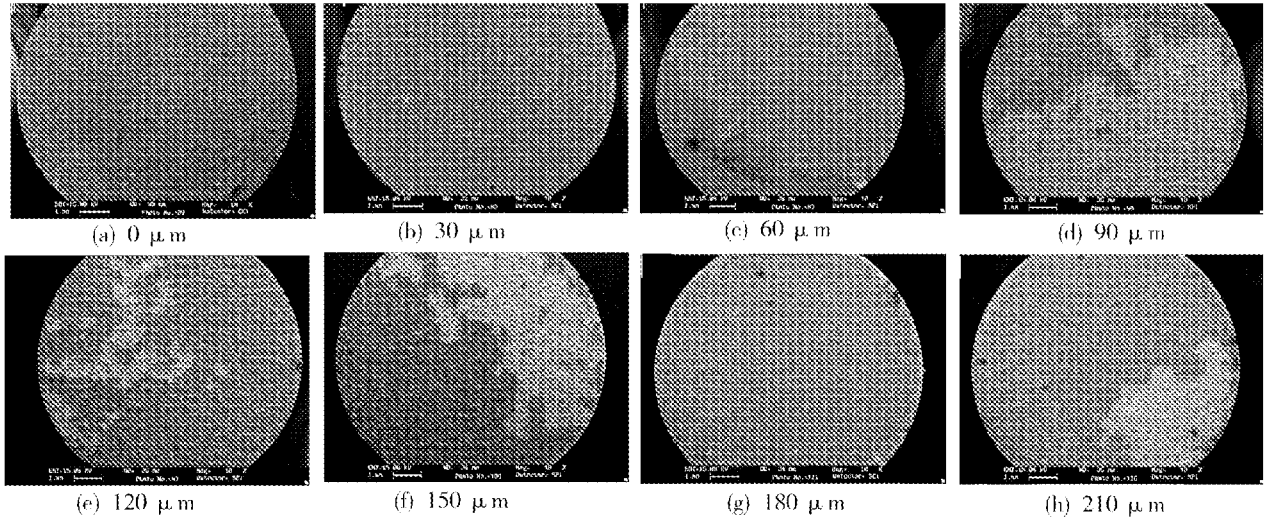


图 3 不同厚度中间层的 P/M TC4 - GCr15 扩散焊接头的断口 SEM 照片

Fig. 3 SEM photos of fracture surfaces of P/M TC4 - GCr15 HIP diffusion bonding joints with interlayer of different thickness

从图 3(a) 可以看出, 扩散接头是在 TC4 - GCr15 界面上断裂的, 断裂表面凹凸不平, 其断裂源发生在 TC4 预合金粉末缝隙间的 GCr15 上 (图 4 中箭头所指处)。

金属间化合物是造成 P/M TC4 - GCr15 扩散接头断裂的主要原因。从图 3(b) ~ (h) 中可以看出断裂发生在 Ni - TC4 界面处。在断口上有浅灰色片状生成物。利用 SEM 照片对其断裂的原因进行了分析, 发现这些接头的断裂主要发生在灰色的生成物上, 如图 5 (图中箭头所指处为断裂源) 所示。按照试棒抗拉强度变化规律的不同, 将有中间层的试棒分为图 3(b) ~ (e) 和图 3(f) ~ (h) 两组进行分析。

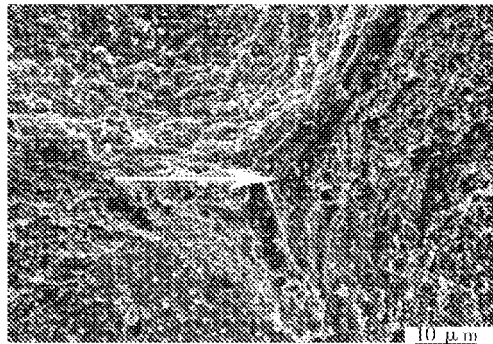
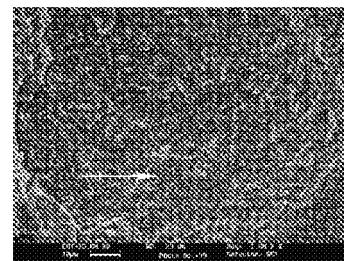


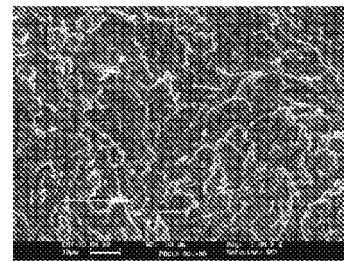
图 4 不带中间层的 P/M TC4 - GCr15 扩散接头断裂源的 SEM 照片

Fig. 4 SEM photos of fracture source of P/M TC4 - GCr15 diffusion bonding joints without interlayer

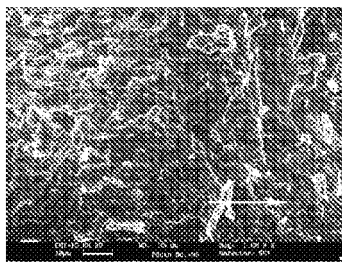
在原始 TC4 预合金粉末颗粒的间隙处存在着大量缺陷和杂质, 该处的能量比其他地方高, 有利于原子扩散。对此处进行成分化学分析, 发现此处聚集着 Fe、Cr、Ni、Ti 等元素。根据 S. Kundu 和何鹏的研究, 在断裂源处应存在 Ti - Fe 系和 Ti - Cr 系的金属间化合物^[6~7]。对图 3(a) 的断口处进行 XRD 分析, 发现上面有 FeTi、Cr₂Ti 和 Fe₂Ti 等金属间化合物, 这些



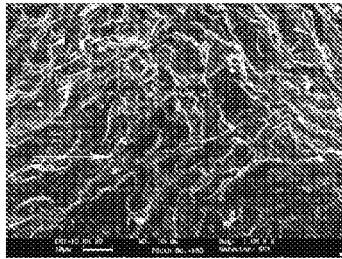
(a) 30 μm



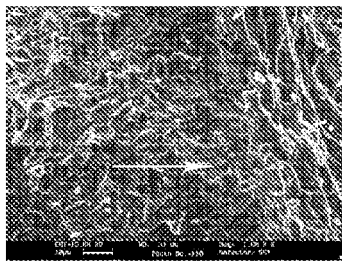
(b) 60 μm



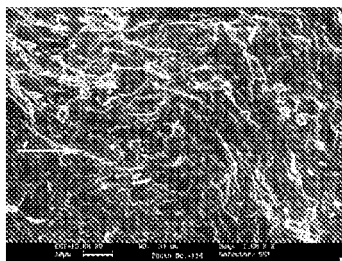
(c) 90 μm



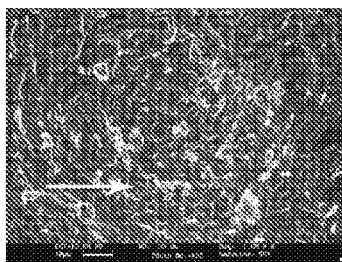
(d) 120 μm



(e) 150 μm



(f) 180 μm



(g) 210 μm

图5 不同厚度中间层的 P/M TC4 - GCr15 扩散焊接头拉伸试棒的断口 SEM 照片

Fig.5 SEM photos of fracture surfaces of test pieces for P/M TC4-GCr15 diffusion bonding joints with interlayer of different thickness

经化学成分检测,图 3(b) ~ (e) 上的生成物是 Fe - Cr - Ni - Ti 等元素的生成物。经 XRD 分析,这

些生成物包括 Ni - Fe、Ni - Ti、Fe - Ti、Cr - Ti 等系的化合物(图 6)。

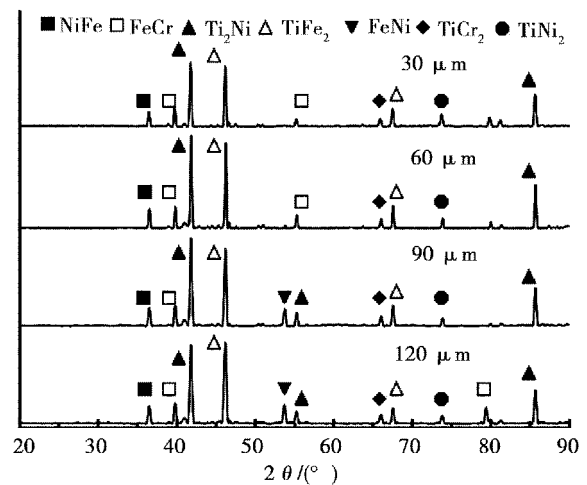


图6 中间层厚度小于 150 μm 的 P/M TC4 - GCr15 扩散焊接头断口的 XRD 分析

Fig.6 XRD analysis of fracture surface of P/M TC4-GCr15 diffusion bonding joints with interlayer's thickness less than 150 μm

当中间层的厚度小于 150 μm 时,Fe、Cr 和 Ti 等元素可以通过相互扩散而在界面处形成 Ni - Ti 系、Fe - Ti 系和 Cr - Ti 系金属间化合物。由于中间层厚度的不同,界面处生成的金属间化合物的种类也不同。一般而言,原子半径越大,其扩散需要的激活能也就越大,所以在同样的扩散焊工艺下,在 TC4 - GCr15 界面处更倾向于生成 Ti - Cr 系的金属间化合物。因此,中间层的厚度越厚,Ti - Fe 系金属间化合物出现的概率越来越小。这一现象也反应在 P/M TC4 - GCr15 热等静压扩散焊接头断口的 XRD 分析上,在中间层厚度为 0 时,界面处的金属间化合物有 FeTi、Fe₂Ti 和 Cr₂Ti;当中间层的厚度在 30 ~ 150 μm 时,界面处的金属间化合物就只有 Fe₂Ti 和 Cr₂Ti,并且随着中间层厚度的增加,Ti 和 Fe、Cr 等原子相遇的概率就越少,生成金属间化合物的概率也就越小,接头强度也就越来越高。

利用 XRD 也对图 3(f) ~ (h) 中试棒的断口进行了生成物的分析,其结果如图 7 所示。虽然相界面上也测试到了 Ti、Cr、Ni、Fe 等元素的存在,但相组成只有 Fe - Ni、Fe - Cr 和 Ni - Ti 等化合物的存在。此时,纯 Ni 可以有效避免 Ti 和 Fe、Cr 相互扩散而形成 Ti - Fe 系和 Ti - Cr 系的金属间化合物。但中间层的厚度越来越大,断口处出现了 NiTi、Ni₂Ti、Ni₃Ti 等金属间化合物,残余的 Ni 也越来越多,这在很大程度上降低了 P/M TC4 - GCr15 热等静压接头的强度,并使接头的强度随着中间层厚度的增加而降低。

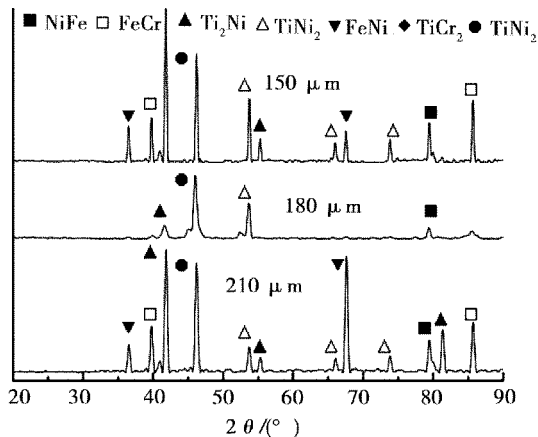


图7 中间层厚度大于150 μm的P/M TC4-GCr15扩散焊接头的XRD分析

Fig.7 XRD analysis of fracture surface of P/M TC4-GCr15 diffusion bonding joints with interlayer's thickness greater than 150 μm

3 结论

中间层的厚度对P/M TC4-GCr15扩散焊接头的强度具有显著影响,其关系如下:

(1)当中间层纯Ni的厚度为0时,由于粉末TC4基体与GCr15基体之间形成了“机械锁扣”,大大降低了TiFe、TiFe₂和TiCr₂等金属间化合物对接头强度的影响,使得P/M TC4-GCr15热等静压扩散焊接头的强度达到了564 MPa。

(2)当中间层Ni的厚度小于150 μm时,不能有效避免TiFe₂和TiCr₂等金属间化合物的产生。但是随着中间层厚度的增加,所生成金属间化合物的种类和数量越来越少,其对P/M TC4-GCr15扩散焊接头强度的影响也越来越小,从而使接头的强度随着中间层厚度的增加而增强,接头强度的最大值为502 MPa。

(3)当中间层Ni的厚度大于150 μm时,虽然有效避免了TiFe₂和TiCr₂等金属间化合物的产生,但是随着中间层厚度的增加,残余的纯Ni也越来越多,其对接头强度的影响也越来越大,使得P/M TC4-GCr15扩散焊接头的强度随着中间层厚度的增加而降低。

参考文献

1 邹莱莲,刘泽文.钛合金TC4与1Cr18Ni9Ti不锈钢的

扩散焊工艺探索.北京航空航天大学学报,1995;21(3):45~50

2 宋敏霞,赵嘉华,郭伟等.钛合金与其它金属材料连接研究现状及发展.焊接,2005;(1):5~7

3 孙荣禄,李慕勤,张九海等.中间过渡金属对钛合金与不锈钢扩散焊接头强度的影响.焊接学报,1996;17(4):212~218

4 Kundu S S C. Interfacial microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded titanium-stainless steel joints using a nickel interlayer. Materials Science and Engineering A,2007;425:107~113

5 Lang Zebao, Wang Liang, Zhang Xuhu. HIP diffusion bonding of P/M titanium alloy Ti-6Al-4V and stainless steel 1Cr18Ni9Ti. Trans. Nonferrous Met. Soc. China,2007;17:79~83

6 Kundu S, Chatterjee S, Olson D et al. Effects of intermetallic phases on the bond strength of diffusion-bonded joints between Titanium and 304 stainless steel using nickel interlay. Metallurgical and Materials Transactions A,2007;(38A):2053~2060

7 He P, Zhang J, Zhou R et al. Diffusion bonding technology of a titanium alloy to a stainless steel web with an Ni interlayer. Mater Charact,1999;43:287~292

8 Wang Liang, Lang Zebao, Shi Hongpei. Properties and forming process of prealloyed powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2007;17(s1):639~643

9 Froes F H, Eylon D. Titanium powder metallurgy-a review. In:Froes F H, Eylon D eds. Titanium Net Shape Technologies. Pennsylvania:The Metallurgical Society of AIME,1984;1~20

10 Sheinker A A, Chananic G R, Bohlen J W. Evaluation and application of prealloyed titanium P/M parts for airframe structures. Int. J. Powder Metall.,1987;23(3):171~179

11 Delo D P, Piehler H R. Early stage consolidation mechanisms during hot isostatic pressing of Ti-6Al-4V powder compacts. Acta. Mater.,1999;47(9):2841~2852

12 《中国航空材料手册》编辑委员会.北京:中国标准出版社,2001:505

13 Kundu S, Chatterjee S. Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer. Mater. Charact.,2007

(编辑 吴坚)