

钛/铝复合板爆炸焊接技术研究进展

田晓东¹, 王小苗¹, 丁旭², 彭艺杰¹, 周仁健¹, 罗海龙³

(1. 长安大学, 陕西 西安 710064)

(2. 西安航空学院, 陕西 西安 710077)

(3. 西安市轻金属爆炸复合材料工程研究中心, 陕西 西安 710086)

摘要: 通过爆炸焊接技术制备的钛/铝复合板可兼具钛合金耐腐蚀性和铝合金低成本的优点。对钛/铝复合板爆炸焊接技术的研究进展进行介绍, 论述了炸药种类、质量比 R 、基覆板间距及爆炸焊接窗口等主要工艺参数对钛/铝复合板组织和性能的影响; 分析了影响钛/铝复合板结合界面的主要因素——金属间化合物种类、扩散层和界面波形; 对钛/铝复合板硬度、抗剪切强度、抗拉强度及拉伸断口的研究进行了汇总分析。最后, 指出了钛/铝复合板爆炸焊接工艺研究的重点发展方向。

关键词: 钛/铝复合板; 爆炸焊接; 结合界面; 工艺参数

中图分类号: TG456.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2020)06-034-07

Research Progress of Explosive Welding Technology for Ti/Al Clad Plates

Tian Xiaodong¹, Wang Xiaomiao¹, Ding Xu², Peng Yijie¹, Zhou Renjian¹, Luo Hailong³

(1. Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

(3. Xi'an Light Metal Explosive Composite Materials Engineering Research Center, Xi'an 710086, China)

Abstract: The Ti/Al clad plate prepared by explosive welding technology can have the advantages of titanium alloy corrosion resistance and aluminum alloy low cost. The research progress of explosive welding technology for Ti/Al clad plates was introduced, and discussed the effects of technological parameters such as explosive types, mass ratio R , base-to-flyer plate spacing and explosive welding window on the structure and performance of Ti/Al clad plates, and the main factors affecting the bonding interface of Ti/Al composite plate were analyzed, including the types of intermetallic compounds, diffusion layer and interface waveform of the interface in the Ti/Al clad plate. The studies on hardness, shear strength, tensile strength and tensile fracture of the Ti/Al clad plate were summarized. Finally, the development trend of explosive welding technology for Ti/Al clad plate is pointed out.

Key words: Ti/Al clad plate; explosive welding; bonding interface; process parameter

钛及钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好及高温力学性能优异的特点, 在航空航天、舰船等行业被广泛使用, 但其价格较高^[1,2]。铝合金密度小, 作为主要的轻量化结构材料, 是制造飞行器蒙皮的主要材料, 在生产工艺和价格上较其他合金有明显优势,

但其耐腐蚀性能较差, 易发生大气腐蚀降低飞行器蒙皮的使用寿命^[3]。同时, 飞行器在稠密大气中超音速飞行时, 受激波与机体间高温压缩气体的加热和机体表面与空气强烈摩擦的影响, 飞行器蒙皮的温度随马赫数的提高而急剧上升, 超过了铝合金的极限使用温度, 使其强度大大削弱。因此将二者性能有效结合起来具有重要意义。但是, 钛、铝之间的性能差异较大, 直接复合具有较大的难度。爆炸焊接又称爆炸复合, 是以炸药为能源进行金属复合的方法, 可实现 300 余种金属材料的复合, 且 50 余

收稿日期: 2020-06-25

基金项目: 2019 年度西安航空科技创业资金项目(2019-01); 大学生创新创业训练项目(S202010710224); 西安市科技创新引导项目(201805032YD10CG16(3))

通信作者: 田晓东(1980—), 男, 副教授。

种金属复合板已投入使用^[4,5]。

本文总结近年来钛/铝复合板爆炸焊接工艺、结合界面组织及其力学性能的研究进展,并指出钛/铝复合板的重点发展方向,以期为推动钛/铝复合板在我国航空航天领域的应用提供参考。

1 钛/铝复合板的爆炸焊接工艺

图1为钛/铝复合板爆炸焊接示意图。均匀铺设在覆板(钛板)上的炸药引燃后,产生的能量转化为覆板的动能,覆板与基板(铝板)发生高速倾斜碰撞,碰撞点产生金属射流清除金属表面的氧化膜及吸附层,洁净的金属表面在高温、高压作用下产生塑性变形、原子扩散及熔化等现象,基覆板产生复合形成钛/铝复合板^[6-8]。

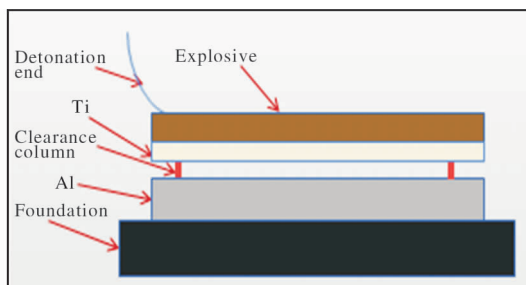


图1 钛/铝复合板爆炸焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of explosion welding of Ti/Al clad plate

钛/铝复合板爆炸焊接通常采用边部中心起爆、基覆板平行法安装^[9-11],以减少因气体残留导致结合界面处产生孔洞等缺陷,避免起爆点附近产生过熔现象而影响复合板质量。根据爆炸系统的状态,爆炸焊接工艺参数可分为静态参数和动态参数。静态参数指爆炸前系统处于静止状态的参数,主要包括炸药种类、质量比 R 、安装形式及间距等。动态参数指爆炸时间段内的参数,主要包括炸药爆炸速度 V_d 、碰撞速度 V_p 、碰撞点移动速度 V_c 及碰撞角 β 等。动态参数由静态参数决定,通过动态参数可计算出理论爆炸焊接窗口^[12,13]。

1.1 静态参数

1.1.1 炸药种类及质量比

炸药是影响爆炸焊接钛/铝复合板质量的决定性因素之一^[14]。炸药种类的选择取决于基覆板材料的声速,为获得稳定的再入射流使基覆板结合界面产生自清理,炸药爆炸速度应小于基板及覆板材料的体积声速^[4,12]。钛、铝的体积声速分别为4786、5370 m/s,

因此多选用爆炸速度 V_d 为1500~2700 m/s的中低速炸药。表1为近年不同文献中钛/铝复合板爆炸焊接主要工艺参数,炸药多选用中低速的铵油混合炸药或岩石粉状乳化炸药(加入食盐可降低爆炸速度)。

质量比 R 计算式如下:

$$R = \frac{\rho_0 \delta_0}{\rho_f \delta_f} \quad (1)$$

式中: ρ_0 为炸药密度, δ_0 为炸药厚度, ρ_f 为覆板密度, δ_f 为覆板厚度。 R 增大导致碰撞速度增加,当碰撞速度大于爆炸焊接窗口下限碰撞速度 V_{pmin} 时,基覆板界面发生塑性变形并产生复合; R 增大则爆炸载荷增大,有利于基覆板发生充分塑性变形增加界面结合强度,但 R 过大时基覆板剧烈碰撞会释放大量热能,导致铝侧发生熔化,使结合界面形成熔化层,降低界面结合强度。根据表1数据,基覆板间距相同时,随质量比 R 增大结合界面由波状结合转变为熔化层结合;基覆板间距不同时,随着质量比与基覆板间距比值的增大,结合界面转变过程为:直线结合→波状结合→熔化层结合。

1.1.2 基覆板间距

基覆板间距为爆炸时覆板加速提供空间。Stivers等人^[26]研究表明,基覆板间距 h 与炸药厚度及覆板厚度有关,计算式为:

$$h = 0.2(\delta_0 + \delta_1) \quad (2)$$

据式(2)计算得到基覆板间距,再结合经验校正,所得复合板结合界面往往为波状结合。表1中基覆板间距与式(2)计算结果相近的爆炸焊接试验,其界面结合方式均为波状结合^[16-18]。

1.2 动态参数

碰撞速度 V_p 、碰撞点移动速度 V_c 及碰撞角 β 是爆炸焊接中主要的动态参数,三者间关系为:

$$V_p = 2V_c \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (3)$$

任取其中2个参数可在同一平面内形成可焊性区域,即爆炸焊接窗口,一般选取 V_c 与 β 计算爆炸焊接窗口。

爆炸焊接窗口由4个边界定义,如图2所示。为确保金属射流的形成,Abrahamson等人^[27]认为 V_{cmax} 应为碰撞角的函数,右边界 V_{cmax} 计算式如下:

$$V_{cmax} = \frac{\beta}{10} + 5.5 \quad (4)$$

左边界为爆炸焊接界面波状结合与直线结合的分界点。为确保形成良好的波状结合界面,碰撞点

表 1 不同文献中钛/铝复合板爆炸焊接工艺参数

Table 1 Experimental parameters for explosive welding of Ti/Al clad plates in different literatures

Parameter	Literature [15]	Literature [16]		Literature [17]		Literature [18]	Literature [19]	Literature [20-23]	Literature [24]	Literature [25]
Base plate	2Al2	1060		1060		1060	2Al2	1050	2Al2	Al
Flyer plater	TA2	TA2		TA2		TA2	TA2	Gr. 2	TA2	Ti
Explosives	Rock powder emulsion explosive	Rock powder emulsion explosive (mixed 38% NaCl)		Rock powder emulsion explosive (mixed 38% NaCl)		Rock powder emulsion explosive (mixed 35% NaCl)	Rock powder emulsion explosive (mixed 50% NaCl)	Ammonium oil mixed explosive	Rock powder emulsion explosive (mixed 50% NaCl)	TNT
$V_d/m \cdot s^{-1}$	2600	2200		2200		2200	2200 ~ 2400	1900 ~ 1950	—	4500
δ_0/mm	25	25	22	20	14	14	16.5	—	24.5	20
δ_1/mm	2	3	2	1	2.5	2.5	2	0.8	4	0.5
h/mm	—	7	5	4	4	4	1.5	1.5	2	1.5
R	—	1.48*	1.95*	3.54*	0.96	1.46	0.96	—	—	—
R/h	—	0.21*	0.39*	0.51*	0.24*	0.37*	0.24*	—	—	—
Combined interface	Wavy	Straight line	Wavy	Melting layer	Wavy	Melting layer	Wavy	Wavy	Wavy	Wavy

* Calculated according to the data in the literature.

移动速度应大于 V_{cmin} , V_{cmin} 计算式如下^[28]:

$$V_{cmin} = \left[\frac{2Re (H_{vp} + H_{vf})}{\rho_p + \rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: Re 为雷诺系数(钛/铝复合板 $Re = 10.6$ ^[13]); H_{vp} 为基板维氏硬度; H_{vf} 为覆板维氏硬度; ρ_p 为基板密度, kg/m^3 ; ρ_f 为覆板密度, kg/m^3 。

下边界 V_{pmin} 为碰撞点的冲击压力大于材料的屈服应力时的最小碰撞速度, 以保证结合界面产生塑性变形, 计算式如下^[29]:

$$V_{pmin} = \left(\frac{R_m}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: R_m 为材料抗拉强度, Pa; ρ 为材料密度, kg/m^3 。

上边界 V_{pmax} 为防止爆炸焊接时结合界面出现熔化层的最大碰撞速度, 计算式如下^[30]:

$$V_{pmax} = \frac{1}{N} \frac{(T_m C)^{\frac{1}{2}}}{V_c} \left(\frac{K C_p C}{\rho_f h_f} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

式中: N 为经验常数, 0.062; T_m 为覆板熔化温度, $^{\circ}C$; C 为覆板体积声速, m/s ; V_c 为碰撞点移动速度(当采用平行法放置时, V_c 为炸药爆炸速度), m/s ; K 为覆板的导热系数, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$; h_f 为覆板厚度, m ; C_p 为覆板的比热容, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 。

以文献[13]中 TA2/2Al2 复合板动态工艺参数计算爆炸焊接窗口, 结果如图 2 所示。研究表明, 在爆炸焊接窗口内选取动态工艺参数, 所得复合板为波状结合且无明显缺陷, 满足生产使用要求。因此深入研究钛/铝复合板爆炸焊接窗口是钛/铝复合板研究的重要方向, 选取合理的动态工艺参数对获得高质量的钛/铝复合板具有重要意义。

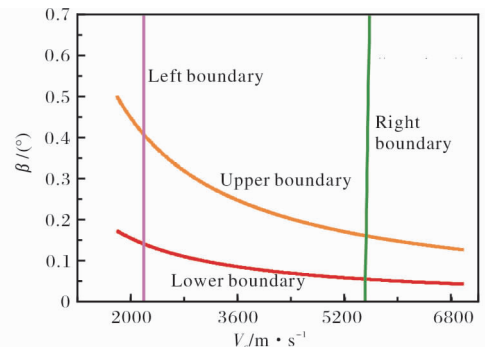


图 2 TA2/2Al2 复合板爆炸焊接窗口

Fig. 2 TA2/2Al2 clad plate explosion welding window

综上所述, 采用边部中心起爆、基覆板平行法安装方式制备钛/铝复合板时, 动态工艺参数应在爆炸焊接窗口内, 炸药选中低速的铵油混合炸药或岩石粉状乳化炸药, 质量比 R 在 0.96 左右, 基覆板间

距为 $h = 0.2(\delta_0 + \delta_1)$ 。

2 钛/铝复合板的界面组织及力学性能

2.1 钛/铝复合板的界面组织

2.1.1 结合界面波形

钛/铝复合板界面结合方式可分为直线结合、波状结合与熔化层结合,如图3所示^[16],其中波状结合复合板结合界面总面积最大,结合状态最佳^[26,31]。

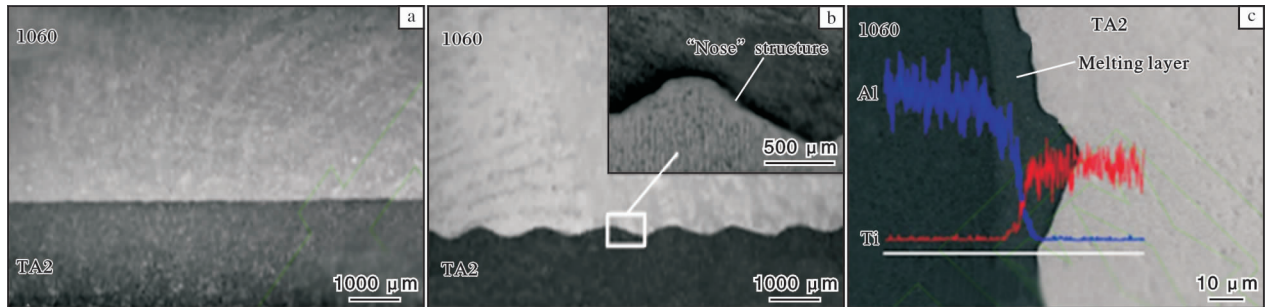


图3 钛/铝复合板不同结合方式的界面形貌^[16]

Fig. 3 Interface morphologies of Ti/Al clad plate with different bonding modes: (a) straight joint; (b) wave joint; (c) melting layer bonding

表征波形的主要参数是波长和波高。已有研究表明,随距起爆点距离的增加波长和波高逐渐增大^[32],随质量比 R 的增大波长和波高也是逐渐增大^[17,18]。复合板爆炸焊接过程中,炸药爆炸由非稳定轰炸向稳定轰炸过渡,导致爆炸载荷逐渐变大,而且,距起爆点越远基覆板间震动越剧烈,基覆板间碰撞载荷增大,从而使波长、波高逐渐变大。

2.1.2 结合界面的扩散层和金属间化合物

复合板爆炸焊接过程中,结合界面存在的化学成分差异会产生元素扩散,适量的元素扩散会提高复合板的结合强度,但过度的元素扩散会导致结合界面生成钛/铝金属间化合物,影响复合板的结合强度^[12]。对不同学者进行的爆炸焊接后钛/铝复合板结合界面形成的金属间化合物进行了汇总,见表2。所形成的化合物通常有 Ti_3Al 、 $TiAl_3$ 、 $TiAl_2$ 、 $TiAl$ 等。Kattner 等人^[42]从热力学角度分析了 Ti-Al 相图,研究认为 $TiAl_3$ 、 Ti_3Al 、 $TiAl$ 为固态钛与液态铝反应生成,高温条件下液态铝与 α -Ti 经共晶反应生成 $TiAl$ 或 α -Ti 经共析反应生成 $TiAl$ 与 Ti_3Al , $TiAl_3$ 由液态铝与 α -Ti 经一系列反应生成,其中生成 $TiAl_3$ 的热力学条件优于生成 $TiAl$ 与 Ti_3Al 。从图4所示钛/铝金属间化合物自由能曲线^[43]可以看出, $TiAl_3$ 、 Ti_3Al 、 $TiAl$ 3种化合物中 $TiAl_3$ 的形成自由能最低。

结合界面波形主要与碰撞速度 V_c 有关,当碰撞速度小于 V_{cmin} 时为直线结合,介于 V_{cmin} 与 V_{cmax} 之间时为波状结合,大于 V_{cmax} 时为熔化层结合。此外,朱锡等人^[31]研究了材料性能对结合界面波形的影响,结果表明,在爆炸载荷的作用下性能相同或近似材料的塑性变形能力几乎相同,复合板结合界面为对称的波状结合,反之则为非对称的波状结合。钛/铝复合板的结合界面通常为非对称的波状结合。

$TiAl_2$ 分为高温下 h - $TiAl_2$ 相与低温下 r - $TiAl_2$ 相, h - $TiAl_2$ 是以 $TiAl$ 为初始相与液态铝经固液反应生成, r - $TiAl_2$ 是由 Ti_2Al_3 经共析反应生成。

爆炸焊接能量由炸药提供,炸药爆炸速度会影响钛/铝复合板结合界面金属间化合物的生成。由表2

表2 爆炸焊接后钛/铝复合板界面形成的金属间化合物

Table 2 Intermetallic compound formed at the interface of Ti/Al clad plate after explosion welding

Researchers	Detonation / $m \cdot s^{-1}$	Intermetallic compound	After heat treatment
Fronczek ^[20-23,33,34]	1900 ~ 1950	$TiAl_3$ 、 Ti_3Al 、 $TiAl$ 、 $TiAl_2$	$TiAl_3$
Hang Tao ^[35]	—	$TiAl_3$ 、 $TiAl_2$ 、 $TiAl$	—
Fang ^[17]	2200	$TiAl_3$ 、 $TiAl_2$	—
Fang ^[18]	2200	$TiAl_3$ 、 $TiAl_2$ 、 $TiAl$	—
Xu Wei ^[32]	—	$TiAl_3$ 、 $TiAl_2$ 、 $TiAl$	—
Paul ^[36]	2200	$TiAl_3$ 、 $TiAl_2$ 、 $TiAl$	—
Kosturek ^[37]	—	$TiAl_3$ 、 $TiAl_2$ 、 $TiAl$	—
Pei ^[38]	—	$TiAl_3$ 、 $TiAl_2$	—
Bataev ^[39]	4200	Not specified	$TiAl_3$
Lazurenko ^[40]	4200	$TiAl_3$ 、 $TiAl_2$	$TiAl_3$
Foadian ^[25,41]	4500	$TiAl_3$	$TiAl_3$

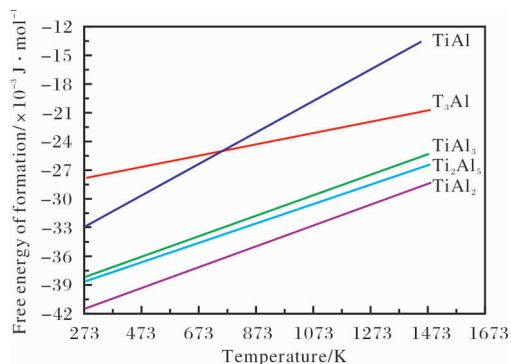


图4 钛铝金属间化合物自由能曲线^[43]

Fig. 4 Free energy curves of Ti-Al intermetallic compounds

可知,在低爆炸速度(1900 ~ 1950 m/s)下结合界面主要生成 TiAl_3 、 Ti_3Al 、 TiAl_2 和 TiAl 化合物;当爆炸速度为 2200 m/s 时,结合界面主要生成 TiAl_3 、 TiAl_2 和 TiAl 化合物;在高爆炸速度(4200 ~ 4500 m/s)下结合界面主要生成 TiAl_3 和 TiAl_2 。这是由于结合界面处温度随爆炸速度的增大而升高,固态钛或 TiAl 与液态铝经固液反应转变成 TiAl_3 及 TiAl_2 。

众多学者^[20-23,25,33,34,39-41]对钛/铝复合板进行了 630 ~ 650 °C 热处理,研究探索其结合界面微观组织演变。结果表明,热处理后的钛/铝复合板结合界面仅生成 TiAl_3 连续层,这是由于 Ti_3Al 形成自由能最低,且生成 TiAl_3 的界面能增加最低,因此在结合界面生成 TiAl_3 的几率最大,热处理后复合板结合界面仅有 TiAl_3 存在。

2.2 钛/铝复合板力学性能和失效机制

钛/铝复合板的力学性能参数通常有界面硬度、弯曲性能、抗剪切强度、抗拉强度等。钛/铝复合板结合界面处硬度为 1.421 ~ 2.499 GPa^[16,17,24,32,36],与爆炸焊接导致的加工硬化程度有关,也与爆炸焊接时结合界面处温度快速上升和下降导致的细晶细化作用有关^[7,12,16,24]。钛/铝复合板抗弯强度通常可达 235 ~ 288 MPa,且弯曲至 160° ~ 180° 结合界面不出现分层^[7,12,15,17,19,22]。其抗剪切强度主要由结合界面原子扩散和波形决定,随工艺不同在 72.1 ~ 151.2 MPa^[12,16-18] 之间;经过(440 ~ 450)°C/(2 ~ 3)h 热处理后,界面抗剪切强度通常为 80 MPa 左右。在基覆板之间增加过渡层(通常为 1060 铝合金),有助于提高界面抗剪切强度^[18]。钛/铝复合板的抗拉强度在 165.5 ~ 430.3 MPa 之间,与基覆板材料牌号、厚度及爆炸焊接工艺有关;延伸率约为 20%^[7,15-19,25]。

钛/铝复合板的拉伸断口为典型的韧性断裂^[12,16,18,35,38],失效通常是由于局部熔化区内金属间化合物在拉应力作用下产生微裂纹,随应变量的增大,裂纹变大并延伸至钛侧、铝侧,使钛/铝复合板结合界面发生分层,最后导致铝侧、钛侧相继断裂。

3 结语

国内外有关钛/铝复合板爆炸焊接的研究已取得一定的成果。按照现有研究成果,炸药可选用铵油混合炸药或岩石粉状乳化炸药(加工业盐),质量比 R 为 0.96 左右,起爆方式为边部中心起爆,基覆板采用平行法安装,基覆板间距为 $h = 0.2(\delta_0 + \delta_1)$;动态工艺参数在爆炸焊接窗口内可减少钛/铝复合板结合界面金属间化合物的产生,有利于得到高界面结合质量的钛/铝复合板。今后,钛/铝复合板爆炸焊接工艺研究应针对当前爆炸焊接中存在的问题,在以下方面加强研究。

(1) 钛/铝爆炸焊接产品形状的研究主要集中在板/板的简单复合,后续应充分发挥爆炸焊接的优势,拓宽钛/铝爆炸焊接的形状,如管与管、板与管等。

(2) 为响应国家绿色环保产业的建设,研究人员应加强研制新型炸药,减少爆炸焊接对环境的污染,提高能源利用率。

(3) 爆炸焊接技术具有不可逆性、瞬时性及危险性的特点,且工艺参数通常为经验公式与实际操作经验共同决定,为获得最优的爆炸焊接工艺须进行多次试验,从而增加试验周期,造成材料及人力的浪费,增加生产成本,因此应不断完善爆炸焊接数值模拟理论,为复合材料爆炸焊接工艺发展提供强有力的支撑。

参考文献

- [1] Kahraman N, Gülcenc B, Findik F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(2): 127 - 133.
- [2] Manikandan P, Hokamoto K, Fujita M, et al. Control of energetic conditions by employing interlayer of different thickness for explosive welding of titanium/304 stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 195(1/3): 232 - 240.

- [3] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1705-1715.
- [4] Findik F. Recent developments in explosive welding[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3): 1081-1093.
- [5] 田广民, 李选明, 赵永庆, 等. 层状金属复合材料加工技术研究现状[J]. 中国材料进展, 2013, 32(11): 696-701.
- [6] Akbari-Mousavi S A A, Barrett L M, Al-Hassani S T S. Explosive welding of metal plates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 202(1/3): 224-239.
- [7] 房中行, 史长根, 冯柯, 等. TA2-1060-TA2 复合板爆炸焊接试验及性能测试[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 87-92.
- [8] 王宇新, 李晓杰, 王小红, 等. 爆炸焊接技术及工程应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(12): 42-47.
- [9] 许祖熙, 段卫东, 金沐, 等. 爆炸焊接复合管工艺及参数研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(4): 67-71.
- [10] 王军宏, 张万生, 李具仓, 等. 爆炸焊接排气方法初探[J]. 铸造技术, 2018, 39(7): 1545-1548.
- [11] 张会锁, 金俊, 赵捍东, 等. 起爆方式对爆炸焊接质量影响的三维数值仿真研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2012, 33(5): 525-529.
- [12] 吴卫明, 张炜, 郭子如, 等. 爆炸焊接对炸药性能要求的探讨[J]. 工程爆破, 2019, 25(1): 68-73.
- [13] 夏鸿博. 钛-铝爆炸复合板的性能及其界面微观结构[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [14] 马志新, 李德富, 胡捷, 等. 采用爆炸-轧制法制备钛/铝复合板[J]. 稀有金属, 2004, 28(4): 797-799.
- [15] 范敏郁, 郭训忠, 崔圣强, 等. 钛/铝/钛三层板的一次爆炸复合[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(3): 770-776.
- [16] 房中行, 史长根, 冯柯, 等. 钛/铝复合板爆炸焊接制造工艺[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), DOI: 10.12018/j.issn.1009-3443, 20181109001.
- [17] Fang Z, Shi C, Shi H, et al. Influence of explosive ratio on morphological and structural properties of Ti/Al clads[J]. *Metals*, 2019, 9(2): 119.
- [18] Fang Z H, Shi C G, Sun Z R, et al. Influence of interlayer technique on microstructure and mechanical properties of Ti/Al cladding plate manufactured via explosive welding[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10): 106519.
- [19] Xia H B, Wang S G, Ben H F. Microstructure and mechanical properties of Ti/Al explosive cladding[J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 1014-1019.
- [20] Fronczek D M, Chulist R, Szulc Z, et al. Growth kinetics of TiAl₃ phase in annealed Al/Ti/Al explosively welded clads[J]. *Materials Letters*, 2017, 198: 160-163.
- [21] Fronczek D M, Wojewoda-Budka J, Chulist R, et al. Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing[J]. *Materials & Design*, 2016, 91: 80-89.
- [22] Fronczek D M, Saksl K, Chulist R, et al. Residual stresses distribution, correlated with bending tests, within explosively welded Ti gr. 2/Al1050 bimetal[J]. *Materials Characterization*, 2018, 144: 461-468.
- [23] Fronczek D M, Chulist R, Litynska-Dobrzynska L, et al. Microstructure changes and phase growth occurring at the interface of the Al/Ti explosively welded and annealed joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(8): 3211-3217.
- [24] 夏鸿博, 王少刚, 贲海峰. 钛/铝爆炸复合板结合区域的微观组织及力学性能的研究[J]. 压力容器, 2013, 30(8): 15-20.
- [25] Foadian F, Soltanieh M, Adeli M, et al. The kinetics of TiAl₃ formation in explosively welded Ti-Al multilayers during heat treatment[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, 47(5): 2931-2937.
- [26] Stivers S W, Wittman R H. Computer selection of the optimum explosive loading and weld geometry[C]//Proceeding of 5th International Conference on High Energy Rate Forming. Colorado: University of Denver Research Institute, 1975: 1-16.
- [27] Abrahamson G R. Permanent periodic surface deformations due to a traveling jet[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1961, 28(4): 519-528.
- [28] Cowan G R, Bergmann O R, Holtzman A H. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1971, 2(11): 3145-3155.
- [29] Li X J, Ma H H, Shen Z W. Research on explosive welding of aluminum alloy to steel with dovetail grooves[J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 815-824.
- [30] Carvalho G, Mendes R, Leal R M, et al. Effect of the flyer material on the interface phenomena in aluminium and copper explosive welds[J]. *Materials & Design*, 2017, 122: 172-183.
- [31] 朱锡, 刘润泉. 爆炸焊接界面波形参数的影响因素[J]. 工程科学学报, 2008, 30(6): 636-639.
- [32] 徐卫, 朱明, 郭胜利, 等. 钛-铝复合板界面组织及其对加工性能的影响[J]. 稀有金属, 2011, 35(3): 342-348.
- [33] Fronczek D M, Chulist R, Litynska-Dobrzynska L, et al. Microstructural and phase composition differences across the interfaces in Al/Ti/Al explosively welded clads[J]. *Metallur-*

- gical and Materials Transactions A, 2017, 48(9): 4154-4165.
- [34] Fronczek D M, Anna W M, Karel S, et al. The intermetallics growth at the interface of explosively welded Al1050/Ti gr. 2/Al1050 clads in relation[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18: 1679-1685.
- [35] 皇涛, 王锬, 陈拂晓, 等. 钛-铝层状复合板冷塑性变形过程损伤演化行为[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 8-12.
- [36] Paul H, Maj L, Prazmowski M, et al. Microstructure and mechanical properties of multi-layered Al/Ti composites produced by explosive welding[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 1391-1398.
- [37] Kosturek R, Wachowski M, Sniezek L, et al. Research on the microstructure of a Ti6Al4V-AA1050 explosive-welded bimetallic joint[J]. Materials and Technology, 2019, 53(1): 109-113.
- [38] Pei Y B, Huang T, Chen F X, et al. In-situ observation of crack evolution in Ti/Al laminated composite[J]. Composite Interfaces, 2019: 1-14.
- [39] Bataev I A, Bataev A A, Mali V I, et al. Structural and mechanical properties of metallic-Intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing[J]. Materials & Design, 2012, 35: 225-234.
- [40] Lazurenko D V, Bataev I A, Mali V I, et al. Explosively welded multilayer Ti-Al composites: Structure and transformation during heat treatment[J]. Materials & Design, 2016, 102: 122-130.
- [41] Foadian F, Soltanieh M, Adeli M, et al. A study on the formation of intermetallics during the heat treatment of explosively welded Al-Ti multilayers[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(4): 1823-1832.
- [42] Kattner U R, Lin J C, Chang Y A. Thermodynamic assessment and calculation of the Ti-Al system[J]. Metallurgical Transactions A, 1992, 23(8): 2081-2090.
- [43] 王少刚. Ti-Al 及 Ti-Al₃Ti 层状复合板的制备技术研究进展[J]. 材料开发与应用, 2018, 33(6): 126-133.

专利信息

一种多孔钛膜专用钛粉末或钛合金粉末的制备方法

申请号: CN201811160706.9

申请日: 20180930

公开(公告)日: 20200417

公开(公告)号: CN109226775B

申请(专利权)人: 西北有色金属研究院

摘要: 本发明公开了一种多孔钛膜专用钛粉末或钛合金粉末的制备方法, 该方法包括: ① 将压制得到钛块或钛合金块置于炉胆中; ② 对炉胆抽真空并保温; ③ 向炉胆中充入氢气进行自蔓延的氢化反应; ④ 钛块或钛合金块吸氢饱和得氢化钛块或氢化钛合金块; ⑤ 粉碎过筛; ⑥ 粗粉破碎; ⑦ 保温脱氢得钛粉末或钛合金脱氢粉; ⑧ 打碎过筛并经磁选和浮选得钛粉末及钛合金粉末。本发明利用氢化反应放出的热量使氢化反应继续进行, 从而产生自蔓延氢化反应, 避免了钛块或钛合金块的氢化不彻底, 提高钛块或钛合金块氢化脆化的程度, 最终得到粒度较细且均匀的钛粉末或钛合金粉末, 提高了钛粉或钛合金粉的品质。

一种通过再结晶测定 β 单相区钛合金相变点温度的方法

申请号: CN202010932106.0

申请日: 20200907

公开(公告)日: 20201208

公开(公告)号: CN112051294A

申请(专利权)人: 中国航发北京航空材料研究院

摘要: 本发明属于钛合金分析检测技术领域, 具体涉及一种通过再结晶测定 β 单相区钛合金相变点温度的方法。本方法通过使 β 单相区组织原始 β 晶粒的破碎和细化, 以及 α 相的动态再结晶和静态再结晶球化, 得到球状或短棒状 α 相, 不仅彻底消除了淬火金相组织遗传效应, 避免马氏体相仍然沿着原始 β 晶粒中的 α 相集束位置生长, 而且显著增大了晶内 α 相与马氏体相形貌差异, 提高了显示度, 极大地提升了 β 单相区钛合金相变点测定的精确性。测定方法适用于钛合金铸锭开坯、均匀化锻造以及锻件生产工艺制定, 通用性强。