



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 02133239.8

[43] 公开日 2003 年 4 月 30 日

[11] 公开号 CN 1413792A

[22] 申请日 2002.10.21 [21] 申请号 02133239.8

[71] 申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

[72] 发明人 冯吉才 何 鹏 钱乙余 张九海
张秉刚

[74] 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利事务所

代理人 于 坤

权利要求书 2 页 说明书 5 页

[54] 发明名称 钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法

[57] 摘要

钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，它涉及钛铝基合金与钢的焊接方法。现有钛铝基合金与钢所采用的是直接扩散焊接，此种方法所得到的接头强度只有 160 ~ 180MPa，很难满足现代高技术、高质化生产的需要。本发明提出的活性复合梯度阻隔扩散焊接是将钛铝基合金与钢之间加入金属箔如钛箔、镍箔、钒箔、铜箔、铌箔，其厚度在 10 ~ 100 μ m 之间，金属表面经过物理及化学清理后，将焊件夹装好置于热力真空焊机内，在真空度为 $1.3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ Torr、焊接压力为 10 ~ 40MPa、焊接温度为 1200 ~ 1350K 时焊接 10 ~ 30min。利用本发明提供的方法得到的扩散焊接接头，强度可达到 400MPa，与钛铝基合金母材的强度接近，可以满足实际应用的需要。

1、钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，其特征在于钛铝基合金与钢之间以金属箔做为活性复合梯度阻隔层，焊前对金属表面进行物理和化学清理，将夹装好的焊件置于热力真空焊机内，在真空度为 $1.3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ Torr、焊接压力为 10~40MPa、焊接温度为 1200~1350K 时焊接 10~30min，焊接结束焊件在原真空条件下降温至 373K 时撤压，降温到室温时，取出焊件。

2、根据权利要求 1 所述的钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，其金属箔为纯钛箔、镍箔、钒箔、铜箔、铌箔。

3、根据权利要求 2 所述的钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，其纯钛箔的厚度为 30~50 μm 、镍箔厚度为 30~100 μm 、钒箔厚度为 30~100 μm 、铜箔厚度为 10~50 μm 、铌箔厚度为 30~100 μm 。

4、根据权利要求 1 所述的钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，其物理清理是用 400[#]、500[#]、600[#]、800[#]、1000[#]金相砂纸逐级磨光。

5、根据权利要求 1 所述的钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，其化学清理是：钢的酸洗剂采用 HNO_3 和 HCl 的混合液，比例为 1: 3，酸洗液在使用前 24 小时内配制，酸洗温度为室温，酸洗时间为 10~40 秒；钛的酸洗剂为 5%HF，在室温下清洗 5~15 秒；钒、铌和铜在 30~70% HNO_3 溶液中清洗 5~10 秒；酸洗后的焊件经清水冲洗后吹干。

6、根据权利要求 1 所述的钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，其夹装焊件是在钛铝基合金与钢之间夹装金属箔，夹装顺序为：钛铝基合金、纯钛箔、镍箔、钢；钛铝基合金、纯钛箔、钒箔、铜箔、钢；钛铝基合金、纯钛箔、铌箔、铜箔、钢。

7、根据权利要求 1 所述的钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，其焊接压力为 10~20MPa；焊接温度 1200~1250K；焊接时间 10~16min；纯钛箔厚度为 30~35 μm 、镍箔厚度为 30~100 μm ，最好 60 μm 。

8、根据权利要求1所述的钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，其焊接压力为21~30MPa；焊接温度1251~1275K；焊接时间17~23min；纯钛箔厚度为36~40 μm ，最好38 μm ，钒箔厚度为30~100 μm ，最好70 μm ；铜箔厚度为10~30 μm 。

9、根据权利要求1所述的钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，其焊接压力为31~40MPa；焊接温度为1276~1350K；焊接时间为24~30min；纯钛箔厚度为41~50 μm ，铌箔厚度为30~100 μm ，最好70 μm ；铜箔厚度为31~50 μm ，最好36 μm 。

10、根据权利要求1所述的钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，其特征在于 a、以钛/镍为活性复合梯度阻隔层，焊接温度最好为1223K，焊接压力最好为15MPa，焊接时间最好为15min； b、以钛/钒/铜为活性复合梯度阻隔层，焊接温度最好为1273K，焊接压力最好为25MPa，焊接时间最好为20min； c、以钛/铌/铜为活性复合梯度阻隔层，焊接温度最好为1280K，焊接压力最好为32MPa，焊接时间最好为25min。

钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法

技术领域：本发明涉及钛铝基合金与钢的焊接方法。

背景技术：随着现代科学技术的发展，人们对材料的性能提出了越来越高的要求。目前，无论是从经济性还是从使用性的角度来说，单一材料已经很难满足现代生产技术对材料综合性能的需求，新材料及异种材料的焊接已成为新技术的前沿和支柱。钛铝基合金具有密度小(约为 3.8g/cm^3)、比强度高、刚性好、良好的高温力学性能和抗氧化等优点，被认为是一种理想的、富有开发应用前景的航空、航天、军事及民用的新型高温结构材料。通过钛铝基合金研究工作的广泛和深入进行，其原存在的室温延性低、热塑性变形能力差和1123K以上抗氧化能力不足等缺陷，在一定程度上得到了相应解决。钛铝基合金在工程上应用，制成构件，必然要碰上焊接问题，包括其自身的焊接及与其它材料的焊接，尤其是与金属的焊接，是实际应用中最常遇到的技术问题。随着现代战争的高技术化，民用产品的高质化及兵器技术的日益发展，对诸如坦克、导弹、超音速飞机、飞船及高级轿车的发动机涡轮材料提出了更高的要求。新型发动机的增压涡轮不仅要求工作温度高，且转速很高，目前采用高温合金制造，密度大，因而要承受很大的离心力，从而导致增压涡轮叶片易发生疲劳断裂，同时由于涡轮高速旋转时惯性较大，使得启动、中止响应慢，机动性差。采用密度小、高温性能良好的钛铝基合金制造，可望使涡轮的重量减少一半以上，这样不仅大大减少了由于离心力所造成的涡轮叶片的疲劳断裂的机会，而且可以大大减少转轴和轴套的磨损，提高发动机的可靠性和使用寿命，同时使得轴承、支架等部件受力状态得到改善，从而使得整个发动机结构优化。但在制造过程中存在钛铝基合金与钢的焊接问题。由于焊接技术不过关，大大限制了钛铝基合金在发动机等重要构件上的应用。钛铝基合金与钢属性能差别较大的材料，因材料的晶体结构不同，两种材料固态下相互溶解量很小，因此在界面区极易生成脆性的金属间化合物及碳化物，从而弱化焊接接头性能。解决这一问题的关键是如何有效的抑制及控制界面层内脆性相的种类、数量、形态及分布。因此成功的解决钛铝基合金与钢的焊接问题及

深入地分析接头的形成机制，模拟扩散焊接过程，对推动钛铝基合金实用化及其它相关新型材料的焊接技术的发展有很大的实际意义及非常深远的理论意义。扩散焊接技术一般是指，在真空条件下使经过精细加工的被焊接表面紧密地靠在一起，在一定的温度及压力下，接触界面原子间相互扩散形成金属键接合，焊接过程中几乎没有变形，是一种精密的焊接方法，焊接质量可靠。但针对于钛铝基合金与钢的焊接，由于其物理性能和化学性能差别较大，两者之间的扩散焊接性较差，特别是界面脆性 TiC 层的生成使得接头性能显著恶化，接头均破断于 TiC 层或 TiC 层与脱碳层之间，即使在最佳扩散焊接条件($T=1223\text{K}$, $t=0.6\text{ks}$, $P=20\text{MPa}$)下，最高强度也仅为 160~180MPa。

发明内容：为了解决现有技术存在的不足，本发明提供了钛铝基合金与钢的一种活性复合梯度阻隔扩散焊接方法，用来提高钛铝基合金与钢的焊接强度，以适应更高层次的需要。本发明用金属箔做为钛铝基合金与钢之间焊接的活性复合梯度阻隔层，焊前对金属表面进行物理和化学清理，将夹装好的焊件置于热力真空焊机内，在真空度为 $1.3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4} \text{Torr}$ 、焊接压力为 10~40MPa、焊接温度为 1200~1350K 时焊接 10~30min。焊接结束焊件在原真空条件下降温至 373K 时撤压，降温到室温时，取出焊件。前面所述的金属箔为纯钛箔、镍箔、钒箔、铜箔、铌箔，其中纯钛箔的厚度是 30~50 μm 、镍箔厚度为 30~100 μm 、钒箔厚度为 30~100 μm 、铜箔厚度为 10~50 μm 、铌箔厚度为 30~100 μm 。所述的物理清理是用 400#、500#、600#、800#、1000# 金相砂纸逐级磨光。所述化学清理为：钢的酸洗剂采用 HNO_3 和 HCl 的混合液，比例为 1: 3，酸洗液在使用前 24 小时内配制，酸洗温度为室温，酸洗时间为 10~40 秒；钛的酸洗剂为 5%HF，在室温下清洗 5~15 秒；钒、铌和铜在 30~70% HNO_3 溶液中清洗 5~10 秒。所述的夹装焊件是在钛铝基合金与钢之间夹装有金属箔，其夹装顺序分别为钛铝基合金、纯钛箔、镍箔、钢；钛铝基合金、纯钛箔、钒箔、铜箔、钢；钛铝基合金、纯钛箔、铌箔、铜箔、钢。本发明的活性复合梯度阻隔层采用镀覆或金属箔直接加入等方法置于待焊两工件的接合面内，加热方式采用感应加热、辐射加热、激光加热、电子束加热等，应用的对象包括各种性能差别较大的异种材料扩散焊接。

具体实施方式二：本实施方式采用钛/钒/铜活性复合梯度阻隔层扩散焊接钛铝基合金与钢，活性复合梯度阻隔层采用纯钛箔，厚度为 $36\sim 40\mu\text{m}$ 、最好 $38\mu\text{m}$ ，钒箔厚度为 $30\sim 100\mu\text{m}$ ，最好 $70\mu\text{m}$ ，铜箔厚度为 $10\sim 30\mu\text{m}$ ，金属钒和铜在 $30\sim 70\%\text{HNO}_3$ 溶液中清洗 $5\sim 10$ 秒；焊接温度 $1251\sim 1275\text{K}$ ，最好 1273K ，焊接压力 $20\sim 31\text{MPa}$ ，最好 25MPa ，焊接时间 $17\sim 23\text{min}$ ，最好 20min 。其它工艺条件及工艺过程与实施方式一相同。

钛/钒/铜活性复合梯度阻隔层扩散焊接钛铝基合金与钢的实验表明，在 Ti/V 、 V/Cu 及 Cu/40Cr 的焊接界面处均出现了对焊接性能有利的无限固溶体层，而在 TiAl/Ti 界面处形成了 $(\text{Ti}_3\text{Al}+\text{TiAl})$ 双相层及 Ti(ssAl) 固溶体层。由于 TiAl/Ti 界面处形成了对提高接头强度有利的 $(\text{Ti}_3\text{Al}+\text{TiAl})$ 双相层，接头强度最大值可达到 $410\sim 430\text{MPa}$ 。且从强度值试验数据来看，直接扩散焊接高强工艺参数范围内的强度值较分散，接头可靠性差，而 Ti/V/Cu 活性复合梯度阻隔层的使用，有效避免了导致接头性能严重弱化的脆性相的生成，从而使 TiAl 基合金与钢的焊接强度显著提高，基本接近 TiAl 基合金母材的强度，可以满足实际应用的需要。

具体实施方式三：本实施方式采用钛/铌/铜活性复合梯度阻隔层扩散焊接钛铝基合金与钢，活性复合梯度阻隔层采用纯钛箔，厚度为 $41\sim 50\mu\text{m}$ 、铌箔厚度为 $30\sim 100\mu\text{m}$ ，最好 $70\mu\text{m}$ ，铜箔厚度为 $31\sim 50\mu\text{m}$ ，最好 $36\mu\text{m}$ ，金属铌在 $30\sim 70\%\text{HNO}_3$ 溶液中清洗 $5\sim 10$ 秒；焊接温度 $1276\sim 1350\text{K}$ ，最好 1280K ，焊接压力 $31\sim 40\text{MPa}$ ，最好 32MPa ，焊接时间 $24\sim 30\text{min}$ ，最好 25min 。其它工艺条件及工艺过程与实施方式一相同。

钛/铌/铜活性复合梯度阻隔层扩散焊接钛铝基合金与钢的实验表明，在 Ti/Nb 、 Nb/Cu 及 Cu/40Cr 的焊接界面处出现了对焊接性能有利的无限固溶体层，而在 TiAl/Ti 界面处形成了 $(\text{Ti}_3\text{Al}+\text{TiAl})$ 双相层及 Ti(ssAl) 固溶体层。接头强度最大值可达到 $420\sim 430\text{MPa}$ ，基本接近钛铝基合金母材的强度，可以满足实际应用的需要。

针对于钛铝基合金与钢的扩散焊接，本发明提出的活性复合梯度阻隔扩散焊接配方及工艺，与常规的直接扩散焊接方法相比，接头强度可提高到 400MPa，与钛铝基合金母材的强度接近，可以满足实际应用的需要，接头的可靠性也大大增强，成品率高。

具体实施方式一：本实施方式采用钛/镍活性复合梯度阻隔层扩散焊接钛铝基合金与钢，扩散焊接材料分别为钛铝基合金(Ti-48Al-2Cr-2Nb)、40Cr 钢(40CrA)、纯钛(TA₂)，其化学成分、物理性能及机械性能如表 1、表 2 所示，钛铝基合金为 $\phi 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的圆柱及 $10 \times 5 \times 30\text{mm}$ 钢的对接件，活性复合梯度阻隔层采用纯钛箔，厚度为 $30 \sim 35 \mu\text{m}$ 、镍箔厚

表 1 试验材料的化学成分 (at%)

	Al	Ni	Cr	Nb	Ti	V	Fe	Si	C	N	O	Mn	S	P	Cu
TiAl	47.2	1.17	0.56	0.11	51.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TC4	5.50	—	—	—	base	4.50	0.30	0.15	0.10	0.05	0.15	—	—	—	—
Ti	—	—	—	—	base	—	0.30	0.15	0.10	0.05	0.20	—	—	—	—
40Cr	—	0.18	0.95	—	—	—	base	0.27	0.40	—	—	0.65	0.01	0.01	—
Ni	—	base	—	—	—	—	0.005	—	0.003	—	—	—	—	—	0.003
V	0.02	—	0.03	—	—	base	—	0.01	0.004	0.005	0.004	—	—	—	0.02
Cu	—	—	—	—	0.001	—	0.003	0.001	—	—	0.035	—	0.001	—	base

表 2 试验材料的物理及机械性能

	物理性能					机械性能		
	密度 g/cm^3	热膨胀系数 $10^6/\text{K}$	弹性模量 GPa	熔点 K	泊松比	σ_b MPa	σ_s MPa	δ_5 %
TiAl	3.76	10.8	176	1733	0.30	480	450	3
TC4	4.45	7.9	97	1873	0.34	910	810	17
Ti	4.51	8.4	94	1913	0.40	450	270	42
40Cr	7.82	14.2	211	1673	0.29	937	789	15
Ni	8.91	13.3	205	1726	0.30	450	405	30
V	6.12	8.3	132	2175	—	536	452	39
Cu	8.89	17.3	108	1357	0.35	221	69	50

度为 30~100 μm ，最好 60 μm ，采用电阻加热 Gleeble-1500 型热/力模拟试验机及辐射加热真空扩散焊机或真空高频加热炉。加热设备均采用油压加压，工作室可充入保护气体，也可以由真空系统抽成真空，真空度 $1.3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4} \text{Torr}$ 、焊接过程各工艺参数可程序控制和手动控制。被焊接表面用 400#、500#、600#、800#、1000# 金相砂纸逐级磨光。考虑到实际金属表面存在着复杂的吸附层和氧化膜，影响焊接质量，对于上述磨光的表面再进行化学清理，去除金属表面吸附层及氧化膜，钢的酸洗剂采用 HNO_3 和 HCl 的混合液，其比例为 1:3，酸洗液在使用前 24 小时内配制，酸洗温度为室温，酸洗时间为 30 秒，钛的酸洗剂为 5% 的 HF ，在室温下清洗 10 秒；金属镍不需酸洗，焊前用丙酮擦拭即可；酸洗后的焊件经清水冲洗后吹干。焊接温度通过热电偶来测量及控制。焊前在已清理好的焊件上焊热电偶，使两热电偶的焊点尽可能靠近，且在同一周线上，焊点位置距端面距离控制在 1mm 左右，以保证过程温度与实际温度接近或相等。为了使焊件的温度场大致相同，热电偶所焊位置和夹头间距尽量保持一致，热电偶焊在钢的一侧，然后进行夹装，夹装的顺序为钛铝基合金、纯钛箔、镍箔、钢，纯钛箔与镍箔被夹在钛铝基合金与钢之间，注意防止焊件的错边。焊件安装完毕后关闭真空室，打开真空泵，待真空度达到 $1.3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4} \text{Torr}$ 时，接通电源进行焊接，此时的温度应在 1200~1250K 之间，最好为 1223K，压力应在 10~20MPa 之间，最好是 15MPa，焊接时间是 10~16min，最好 15min。焊接结束后，切断电源，焊件在原真空条件下降温至 373K 时撤压，降温至室温时，从真空室中取出焊件，其目的是为了防止焊件在高温下发生氧化。

钛/镍活性复合梯度阻隔层扩散焊接钛铝基合金与钢的实验表明，接头断于镍-钢和断于镍-钛之间的比例大致相等，接头强度可达 380~400MPa，比直接扩散焊接高近一倍，接头的界面微观结构为 $\text{TiAl}(\text{Ti}_3\text{Al}+\text{TiAl})/\text{Ti}(\text{ss.Al})/\text{Ti}/\text{TiNi}_3/\text{TiNi}/\text{Ti}_2\text{Ni}/\text{Ni}/\text{Ni-Fe}$ 固溶体/40Cr。镍-钛界面扩散层(各反应相及 β Ti 转变层)厚度主要受焊接的时间及温度影响，焊接压力的影响较小。扩散层厚度的对数与焊接温度倒数成正比，各反应相及 β Ti 转变层的厚度与焊接时间的平方根成正比。钛镍作活性复合梯度阻隔层可成功地焊接钛铝基合金与钢。