



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102120281 A

(43) 申请公布日 2011. 07. 13

(21) 申请号 201110038333. X

*B23K 35/38* (2006. 01)

(22) 申请日 2011. 02. 15

(71) 申请人 洛阳双瑞精铸钛业有限公司

地址 471039 河南省洛阳市高新技术开发区  
凌波路

(72) 发明人 周洪强 陈志强 姜建伟 吴胜男  
刘国良

(74) 专利代理机构 洛阳市凯旋专利事务所  
41112

代理人 王自刚

(51) Int. Cl.

*B23K 1/00* (2006. 01)

*B23K 1/002* (2006. 01)

*B23K 1/008* (2006. 01)

*B23K 1/19* (2006. 01)

*B23K 35/30* (2006. 01)

权利要求书 1 页 说明书 6 页

(54) 发明名称

一种钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法

(57) 摘要

本发明介绍了一种钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法, 转子材质原子组成为: Ti-(46-47)Al-(3. 5-4. 5)Nb-(0. 5-1. 5)Cr-(0. 2-0. 6)Ni-(0. 2-0. 8)Si; 钢轴为 42CrMo、40Cr、35CrMo 结构钢, 钎料为 BNi73CrFeSiB(C)、BNi82CrSiBFe、BNi92SiB、BNi95SiB、BNi71CrSi; 钎料厚度 0. 02-0. 20mm; 钎焊温度液相线以上 10-80℃; 压力为 0. 1-20MPa; 时间 30s-30min。本发明钎焊后的接头室温抗拉强度  $R_m \geq 235\text{MPa}$ ; 600℃抗拉强度  $R_m \geq 220\text{MPa}$ , 满足使用要求。

1. 一种钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法, 转子材质成分为: Ti-(46-47at%)Al-(3.5-4.5at%)Nb-(0.5-1.5at%)Cr-(0.2-0.6at%)Ni-(0.2-0.8at%)Si; 适用的钢轴的结构钢为: 42CrMo、40Cr 或 35CrMo 结构钢, 钎焊用钎料为 BNi73CrFeSiB(C)、BNi82CrSiBFe、BNi92SiB、BNi95SiB 或 BNi71CrSi; 钎焊设备为感应钎焊设备或真空钎焊设备, 感应钎焊时, 涡轮与钢轴需要在惰性气体保护下进行高频感应钎焊; 真空钎焊时, 钎焊炉内需要保持一定的真空度; 钎焊工艺为:

(1) 钎料厚度 0.02-0.20mm;

(2) 钎焊温度: 钎料液相线温度以上 10-80°C;

(3) 钎焊压力为 0.1-20MPa;

(4) 钎焊时间 30 秒 -30min;

(5) 真空钎焊时真空度:  $1 \times 10^{-4}$ — $1 \times 10^{-1}$  Pa; 感应钎焊时采用氩气进行钛铝与钢轴钎焊时的惰性气体保护。

2. 根据权利要求 1 所述钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法, 其特征是: 所述的钎料厚度为 0.03-0.05mm。

3. 根据权利要求 1 所述钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法, 其特征是: 所述的钎焊温度为钎料液相线以上 30-50°C。

4. 根据权利要求 1 所述钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法, 其特征是: 所述的钎焊压力为 2-8Mpa。

5. 根据权利要求 1 所述钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法, 其特征是: 真空钎焊时真空度为  $(1-10) \times 10^{-2}$  Pa。

6. 根据权利要求 1 所述钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法, 其特征是: 所述的 42CrMo 结构钢的化学成分质量百分比组成为: C/0.38-0.45, Si/0.17-0.37, Mn/0.5-0.8, Mo/0.15-0.25, Cr/0.9-1.25, 其余为铁; 40Cr 结构钢材质化学成分质量百分比组成为: C/0.37-0.44, Si/0.17-0.37, Mn/0.5-0.8, Cr/0.8-1.1, 其余为铁; 35CrMo 结构钢材质与质的化学成分质量百分比组成为: C/0.32-0.40, Si/0.17-0.37, Mn/0.4-0.7, Mo/0.15-0.25, Cr/0.8-1.1, 其余为铁。

7. 根据权利要求 1 所述钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法, 其特征是: 所述 BNi73CrFeSiB(C) 钎料的化学成分质量百分比组成为 Co  $\leq$  0.1, Cr/13-15, Si/4-5, B/2.75-3.5, Fe/4-5, C/0.6-0.9, P  $\leq$  0.02, Ni 为余量; BNi82CrSiBFe 钎料的化学成分质量百分比组成为 Co  $\leq$  0.1, Cr/6-8, Si/4-5, B/2.75-3.5, Fe/2.5-3.5, C  $\leq$  0.06, P  $\leq$  0.02, Ni 为余量; BNi92SiB 钎料的化学成分质量百分比组成为 Co  $\leq$  0.1, Si/4-5, B/2.75-3.5, Fe  $\leq$  0.5, C  $\leq$  0.06, P  $\leq$  0.02, Ni 为余量; BNi95SiB 钎料的化学成分质量百分比组成为 Co  $\leq$  0.1, Si/3-4, B/1.5-2.2, Fe  $\leq$  1.5, C  $\leq$  0.06, P  $\leq$  0.02, Ni 为余量; BNi71CrSi 钎料的化学成分质量百分比组成为 Co  $\leq$  0.1, Cr/18.5-19.5, Si/9.75-10.5, B  $\leq$  0.03, C  $\leq$  0.06, P  $\leq$  0.02, Ni 为余量。

## 一种钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法

[0001]

### 技术领域

[0002] 本发明涉及一种焊接技术,特别是一种钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法。

### 背景技术

[0003] 随着航空、航天、汽车、舰船等发动机性能不断提高,对高温材料的性能要求更高,即更高的强度、抗氧化性能和更轻的密度等。 $\gamma$ -TiAl 基合金材料具有良好的高温强度、蠕变抗力和抗氧化性能等优点,正在发展成为新一代航空发动机材料,可用于制造压气机、燃气轮机叶片、压气机定子挡风板,定子机座以及其他形状复杂的大尺寸铸造和锻造零件,部分替代笨重的镍基高温合金可减重约 50%。 $\gamma$ -TiAl 基合金已用于制造汽车发动机的涡轮增压器、气阀等,可用于增压器涡轮转子的钛铝材料有美国材料 Ti48Al2Cr2Nb、日本大同特钢公司专利 Ti-(32-36wt%)Al-(0.1-2 wt%)Si-(0.1-5wt%)Nb-(0.1-3wt%)Cr,以及中国专利 ZL200910064183.2 钛铝材料 Ti-(46-47at%)Al-(3.5-4.5at%)Nb-(0.5-1.5at%)Cr-(0.2-0.6at%)Ni-(0.2-0.8at%)Si。

[0004] 用 TiAl 制造的涡轮叶片必须与钢轴焊接才能组成一个完整的零件,常用的钢轴材料为 42CrMo、40Cr、35CrMo。目前,车用涡轮增压器的涡轮最常用的连接方式是高温镍基合金涡轮与钢轴直接摩擦焊接或采用电子束焊接。由于 TiAl 合金焊接性能较差,目前应用于涡轮增压器的一大难题就是 TiAl 合金涡轮与钢质转轴的连接技术。钛铝涡轮与钢轴焊接的关键问题是在界面处有中间相的形成和两种材料的线膨胀系数不同,室温至 700℃,TiAl 的线膨胀系数为  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,比钢材的  $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  要小,两种材料直接焊接后热应力很大,焊接件出现裂纹或脆性断裂。因此,TiAl 合金材料的特殊性决定了 TiAl 合金涡轮不可能采用直接摩擦焊接或采用电子束焊接这两种通用的方式实现 TiAl 合金涡轮与钢轴的连接。

[0005] 申请号 97125874.0 的中国专利,在钛铝涡轮与钢轴的连接过程中引入了中间过渡体的方案,TiAl 合金涡轮与钢轴的连接结构采用加中间过渡体的连接结构,过渡体的材料选择普通的镍基高温合金。具体连接方案是 TiAl 合金涡轮与中间过渡体采用热装过盈配合,中间过渡体与钢轴采用摩擦焊接连接。

[0006] 李玉龙、何鹏、冯吉才等人在《焊接》2005(10)发表的“TiAl 基合金与钢连接技术研究进展”中报道,日本的 T. Tetsui 等人采用 Ni 基合金套过渡的连接方法连接 TiAl 合金涡轮与钢轴,首先采用钎焊的方法连接 TiAl 与 Ni 基合金套,再采用电子束的方法来连接 Ni 基合金套与结构钢轴。Tetsui 连接的这种采用 Ni 基合金过渡的涡轮增压转子已装配在三菱公司某型号发动机上,进行了发动机运转试验,取得了较好的效果。

[0007] 以上加中间体的连接方式虽然可以连接钛铝涡轮与钢轴,但增加了生产工序和成本,不利于大批量产业化生产。钛铝涡轮与钢轴直接钎焊连接是目前认为最合理、可靠的节

约成本的大规模产业化推广方式。

[0008] 张轲、吴鲁海、楼松年、阮鹤在《焊接》2002(10)发表的“TiAl/40Cr的扩散钎焊”中报道,为改善TiAl/40Cr接头的可焊性和增加连接强度,选用Ti含量为4%、熔化温度大约为800℃、厚度为0.20mm的Ag-Cu-Ti箔作为中间层,焊接方法采用真空钎焊,焊接参数为:焊接压力0.4 MPa,焊接时间10 min,焊接温度900℃,真空度 $10^{-2}$ Pa;接头的抗拉强度为387 MPa,约等于母材的抗拉强度。以Ag-Cu-Ti为钎料的接头强度高的一个原因是焊缝中Ag、Cu、Ti三元素都发生了较为强烈的扩散,并生成了富Ag的A相单相Ag和富Cu的B相金属间化合物 $AlCu_2Ti$ 相,由于 $AlCu_2Ti$ 相为 $B_2$ 结构,是一种比较坚硬的相,当该相的厚度比较薄时,就起到了增强的作用。

[0009] 朱颖、张莱、王国建、康慧、曲平在《航天制造技术》2005.8发表的“TiAl基合金和42CrMo钢的真空钎焊”中报道,对TiAl基合金和42CrMo钢进行钎焊,钎料成分为Ti-20Zr-Cu-Ni;钎料采用快速凝固方法制备,制备的箔片厚度约为0.05mm;钎焊工艺参数为:真空度 $1.0 \times 10^{-3}$ Pa,钎焊温度930℃,保温时间分别为15min、30min、60min;接头平均拉伸强度110MPa,接头的断裂层均在42CrMo母材与钎料间的界面层。

[0010] 废气涡轮增压是现代汽油机和柴油发动机提高功率的主要技术之一,增压涡轮在发动机燃油废气驱动下高速旋转工作,柴油机涡轮转速通常为 $(5-20) \times 10^4$ r/min,汽油机涡轮转速通常可达 $(25-26) \times 10^4$ r/min,且涡轮需要长时间承受700-950℃左右的高温工作环境。增压涡轮通过结构钢轴与铝制压气机轮连接带动压气机轮工作,增压涡轮转子与结构钢轴连接处工作温度可达500-600℃。使用银基钎料和钛基钎料进行钛铝涡轮与钢轴的钎焊,钎焊的接头虽然可以满足增压器涡轮转子室温使用要求,但钎焊接头难以在500-600℃下长时间工作。

[0011] 钎焊时钎料的选择需要根据钛铝合金的材质不同、钢轴的材质的不同进行分析和选择,正如钎焊文献中讲述,钎焊时钎料与钛铝合金之间、钎料与钢轴之间、钢轴与钛铝之间均会发生元素的相互扩散,导致钛铝涡轮轴一侧、钢轴一侧以及焊缝处会产生不同的化合物。不同钎料的焊接接头产生的化合物不同,不同的钎料厚度、钎焊温度、保压压力和时间对焊接接头的显微组织具有不同程度的影响,从而使焊接轴的室温和高温强度、塑性等性能产生巨大的差异,最终影响焊接涡轮轴的室温及高温应用。因此,需要根据不同的钛铝涡轮材质和钢轴材质合理选择钎焊用钎料的种类,以及钎焊时的工艺参数。

[0012]

## 发明内容

[0013] 本发明所要解决的技术问题是提供一种钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法,供适用于中国专利ZL200910064183.2报道的Ti-(46-47at%)Al-

(3.5-4.5at%)Nb-(0.5-1.5at%)Cr-(0.2-0.6at%)Ni-(0.2-0.8at%)Si钛铝合金材质涡轮转子与42CrMo、40Cr、35CrMo结构钢轴进行焊接,通过选择合理的钎料以及钎焊的工艺参数,使性能差异较大的钛铝合金涡轮转子与钢轴能够牢固地结合以满足车用发动机增压转子系统的工况要求,保证涡轮轴焊接接头在500-600℃下长时间工作。

[0014] 为了实现解决上述技术问题的目的,本发明采用了如下技术方案:

本发明的钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法,钛铝合金涡轮转子材料成分原

子百分比组成为:Ti-(46-47at%)Al-(3.5-4.5at%)Nb-(0.5-1.5at%)Cr-(0.2-0.6at%)Ni-(0.2-0.8at%)Si;适用的钢轴的结构钢为:42CrMo、40Cr 或者 35CrMo 结构钢,钎焊用钎料为对应美国牌号 BNi-1 的 BNi73CrFeSiB(C)、对应美国牌号 BNi-2 的 BNi82CrSiBFe、对应美国牌号 BNi-3 的 BNi92SiB、对应美国牌号 BNi-4 的 BNi95SiB、对应美国牌号 BNi-5 的 BNi71CrSi;钎焊设备可以选用感应钎焊设备和真空钎焊设备,感应钎焊时,涡轮与钢轴需要在惰性气体保护下进行高频感应钎焊,以防止发生高温氧化;真空钎焊时,钎焊炉内需要保持一定的真空度,以防止发生高温氧化;钎焊工艺为:

(1) 钎料厚度 0.02-0.20mm,优选 0.03-0.05mm;

(2) 钎焊温度:钎料液相线温度以上 10-80℃,优选液相线以上 30-50℃;

(3) 钎焊压力为 0.1-20MPa,优选 2-8MPa;

(4) 钎焊时间 30 秒-30min,真空钎焊优选 5-10min,感应钎焊优选 2-3min;

(5) 真空钎焊时真空度: $1 \times 10^{-4}$ - $1 \times 10^{-1}$  Pa,优选  $(1-10) \times 10^{-2}$  Pa;感应钎焊时采用氩气进行钛铝与钢轴钎焊时的惰性气体保护。这里所说的真空度是指钎焊设备炉膛内的真空余压。

[0015] 所述的 42CrMo 的化学成分质量百分比组成为:C/0.38-0.45, Si/0.17-0.37, Mn/0.5-0.8, Mo/0.15-0.25, Cr/0.9-1.25,其余为铁,对应日本牌号 SCM440、美国牌号 ASTM 4140;40Cr 材质与 42CrMo 相比,除没有 Mo 元素外,其余成分及含量基本相同,该材质化学成分质量百分比组成为:C/0.37-0.44, Si/0.17-0.37, Mn/0.5-0.8, Cr/0.8-1.1,其余为铁,对应日本牌号 SCr440、美国牌号 ASTM 5140;35CrMo 材质与 42CrMo 相比,除 C 含量稍低外,其余成分及含量基本相同,其化学成分质量百分比组成为:C/0.32-0.40, Si/0.17-0.37, Mn/0.4-0.7, Mo/0.15-0.25, Cr/0.8-1.1,其余为铁,对应日本牌号 SCM435、美国牌号 ASTM4135。

[0016] 所述 BNi73CrFeSiB(C) 钎料的化学成分质量百分比组成为  $Co \leq 0.1$ , Cr/13-15, Si/4-5, B/2.75-3.5, Fe/4-5, C/0.6-0.9,  $P \leq 0.02$ , Ni 为余量;BNi82CrSiBFe 钎料的化学成分质量百分比组成为  $Co \leq 0.1$ , Cr/6-8, Si/4-5, B/2.75-3.5, Fe/2.5-3.5,  $C \leq 0.06$ ,  $P \leq 0.02$ , Ni 为余量;BNi92SiB 钎料的化学成分质量百分比组成为  $Co \leq 0.1$ , Si/4-5, B/2.75-3.5,  $Fe \leq 0.5$ ,  $C \leq 0.06$ ,  $P \leq 0.02$ , Ni 为余量;BNi95SiB 钎料的化学成分质量百分比组成为  $Co \leq 0.1$ , Si/3-4, B/1.5-2.2,  $Fe \leq 1.5$ ,  $C \leq 0.06$ ,  $P \leq 0.02$ , Ni 为余量;BNi71CrSi 钎料的化学成分质量百分比组成为  $Co \leq 0.1$ , Cr/18.5-19.5, Si/9.75-10.5,  $B \leq 0.03$ ,  $C \leq 0.06$ ,  $P \leq 0.02$ , Ni 为余量。

[0017] 本发明的各种组成、含量以及配比,如果没有特别说明,均是指质量百分比组成、含量和配比。

[0018] 这些技术方案,包括优选的技术方案也可以互相组合或者结合,从而达到更好的技术效果。

[0019] 通过采用上述技术方案,本发明具有以下有益效果:

本发明的钛铝材质涡轮增压器转子与钢轴的钎焊方法,采用 BNi73CrFeSiB(C)、BNi82CrSiBFe、BNi92SiB、BNi95SiB、BNi71CrSi 作为钎焊用钎料,进行 Ti-(46-47at%)Al-(3.5-4.5at%)Nb-(0.5-1.5at%)Cr-(0.2-0.6at%)Ni-

(0.2-0.8at%)Si 钛铝合金涡轮转子与 42CrMo、40Cr、35CrMo 结构钢轴的真空钎焊和感

应钎焊。钎焊后的接头室温和 600℃时的强度如下：室温抗拉强度  $R_m \geq 235\text{MPa}$ ；600℃抗拉强度  $R_m \geq 220\text{MPa}$ 。满足钛铝涡轮轴与钢轴焊接后的使用要求。

### 具体实施方式

#### [0020] 实施例 1

Ti-46Al-4Nb-0.6Cr-0.2Ni-0.2Si (at%) 钛铝材质涡轮轴与 42CrMo 钢轴, 采用镍基钎料包括对应美国牌号 BNi-1 的 BNi73CrFeSiB(C)、对应美国牌号 BNi-2 的 BNi82CrSiBFe、对应美国牌号 BNi-3 的 BNi92SiB、对应美国牌号 BNi-4 的 BNi95SiB、对应美国牌号 BNi-5 的 BNi71CrSi 进行感应钎焊, 感应钎焊工艺为: 1) 钎料厚度 0.04mm; 2) 钎焊温度: 钎料液相线温度以上 50℃; 3) 钎焊压力为 5MPa; 4) 钎焊时间 2min; 5) 通氩气进行惰性气体保护焊。钎焊后, 焊接接头室温和 600℃抗拉强度如表 1 所示。

#### [0021] 实施例 2

Ti-46Al-4Nb-0.6Cr-0.2Ni-0.2Si (at%) 钛铝材质涡轮轴与 42CrMo 钢轴, 采用镍基钎料 BNi73CrFeSiB(C)、BNi82CrSiBFe、BNi92SiB、BNi95SiB、BNi71CrSi 进行感应钎焊, 感应钎焊工艺为: 1) 钎料厚度 0.02mm; 2) 钎焊温度: 钎料液相线温度以上 80℃; 3) 钎焊压力为 8MPa; 4) 钎焊时间 5min; 5) 通氩气进行惰性气体保护焊。钎焊后, 焊接接头室温和 600℃抗拉强度如表 1 所示。

#### [0022] 实施例 3

Ti-46Al-4Nb-0.6Cr-0.2Ni-0.2Si (at%) 钛铝材质涡轮轴与 42CrMo 钢轴, 采用镍基钎料 BNi73CrFeSiB(C)、BNi82CrSiBFe、BNi92SiB、BNi95SiB、BNi71CrSi 进行真空钎焊, 真空钎焊工艺为: 1) 钎料厚度 0.2mm; 2) 钎焊温度: 钎料液相线温度以上 10℃; 3) 钎焊压力为 20MPa; 4) 钎焊时间 2min; 5) 真空度:  $1 \times 10^{-4}$  Pa。钎焊后, 焊接接头室温和 600℃抗拉强度如表 1 所示。

#### [0023] 实施例 4

Ti-46Al-4Nb-0.6Cr-0.2Ni-0.2Si (at%) 钛铝材质涡轮轴与 40Cr 钢轴, 采用镍基钎料 BNi73CrFeSiB(C)、BNi82CrSiBFe、BNi92SiB、BNi95SiB、BNi71CrSi 进行真空钎焊, 真空钎焊工艺为: 1) 钎料厚度 0.04mm; 2) 钎焊温度: 钎料液相线温度以上 50℃; 3) 钎焊压力为 2MPa; 4) 钎焊时间 10min; 5) 真空度:  $1 \times 10^{-2}$  Pa。钎焊后, 焊接接头室温和 600℃抗拉强度如表 2 所示。

#### [0024] 实施例 5

Ti-46Al-4Nb-0.6Cr-0.2Ni-0.2Si (at%) 钛铝材质涡轮轴与 40Cr 钢轴, 采用镍基钎料 BNi73CrFeSiB(C)、BNi82CrSiBFe、BNi92SiB、BNi95SiB、BNi71CrSi 进行真空钎焊, 真空钎焊工艺为: 1) 钎料厚度 0.02mm; 2) 钎焊温度: 钎料液相线温度以上 80℃; 3) 钎焊压力为 0.1MPa; 4) 钎焊时间 30min; 5) 真空度:  $1 \times 10^{-1}$  Pa。钎焊后, 焊接接头室温和 600℃抗拉强度如表 2 所示。

#### [0025] 实施例 6

Ti-46Al-4Nb-0.6Cr-0.2Ni-0.2Si (at%) 钛铝材质涡轮轴与 40Cr 钢轴, 采用镍基钎料 BNi73CrFeSiB(C)、BNi82CrSiBFe、BNi92SiB、BNi95SiB、BNi71CrSi 进行感应钎焊, 感应钎焊工艺为: 1) 钎料厚度 0.2mm; 2) 钎焊温度: 钎料液相线温度以上 10℃; 3) 钎焊压力为 20MPa;

4) 钎焊时间 30 秒;5) 通氩气进行惰性气体保护焊。钎焊后,焊接接头室温和 600℃抗拉强度如表 2 所示。

[0026] 实施例 7

Ti-46Al-4Nb-0.6Cr-0.2Ni-0.2Si(at%) 钛铝材质涡轮轴与 35CrMo 钢轴,采用镍基钎料 BNi73CrFeSiB(C)、BNi82CrSiBFe、BNi92SiB、BNi95SiB、BNi71CrSi 进行真空钎焊,真空钎焊工艺为:1) 钎料厚度 0.04mm;2) 钎焊温度:钎料液相线温度以上 50℃;3) 钎焊压力为 2MPa;4) 钎焊时间 10min;5) 真空度: $1 \times 10^{-2}$  Pa。钎焊后,焊接接头室温和 600℃抗拉强度如表 2 所示。

[0027]

表 1 钛铝涡轮与钢轴的钎焊工艺参数及钎焊接头力学性能表

钛铝材质涡轮轴	钢轴	镍基钎料		钎焊工艺	焊接接头室温抗拉强度 (MPa)	焊接接头 600℃抗拉强度 (MPa)
		钎料种类	液相线温度			
Ti-46Al-4Nb-0.6Cr-0.2Ni-0.2Si(at%)	42CrMn	BNi73CrFeSiB(C)	1060℃	(一) 感应钎焊工艺 1) 钎料厚度 0.04mm;2) 钎焊温度:钎料液相线温度以上 50℃;3) 钎焊压力为 5MPa;4) 钎焊时间 2min;5) 通氩气进行惰性气体保护焊。	265	245
		BNi82CrSiBFe	1000℃		270	255
		BNi92SiB	1040℃		260	250
		BNi95SiB	1065℃		245	230
		BNi71CrSi	1135℃		255	235
Ti-46Al-4Nb-0.6Cr-0.2Ni-0.2Si(at%)	42CrMn	BNi73CrFeSiB(C)	1060℃	(二) 感应钎焊工艺 1) 钎料厚度 0.02mm;2) 钎焊温度:钎料液相线温度以上 80℃;3) 钎焊压力为 8MPa;4) 钎焊时间 5min;5) 通氩气进行惰性气体保护焊。	255	235
		BNi82CrSiBFe	1000℃		245	230
		BNi92SiB	1040℃		250	235
		BNi95SiB	1065℃		240	225
		BNi71CrSi	1135℃		245	230
Ti-46Al-4Nb-0.6Cr-0.2Ni-0.2Si(at%)	42CrMn	BNi73CrFeSiB(C)	1060℃	(三) 真空钎焊工艺 1) 钎料厚度 0.2mm;2) 钎焊温度:钎料液相线温度以上 10℃;3) 钎焊压力为 20MPa;4) 钎焊时间 2min;5) 真空度: $1 \times 10^{-2}$ Pa。	245	230
		BNi82CrSiBFe	1000℃		260	245
		BNi92SiB	1040℃		255	230
		BNi95SiB	1065℃		240	225
		BNi71CrSi	1135℃		235	220

表 2 钛铝涡轮与钢轴的钎焊工艺参数及钎焊接头力学性能

钛铝材质 涡轮轴	钢轴	镍基钎料		钎焊工艺	焊接接 头室温 抗拉强 度(MPa)	焊接接 头 600℃ 抗拉强 度(MPa)
		钎料种类	液相线温 度			
Ti-46Al-4N b-0.6Cr-0.2 Ni -0.2Si(at%)	40Cr	BNi73CrFeSiB(C)	1060℃	(一) 真空钎焊工艺 1) 钎料厚度 0.04mm; 2) 钎焊温度: 钎料液 相线温度以上 50℃; 3) 钎焊压力为 2MPa; 4) 钎焊时间 10min.5)	255	245
		BNi82CrSiBFe	1000℃		250	230
		BNi92SiB	1040℃		260	245
		BNi95SiB	1065℃		255	235
		BNi71CrSi	1135℃		265	250
Ti-46Al-4N b-0.6Cr-0.2 Ni -0.2Si(at%)	40Cr	BNi73CrFeSiB(C)	1060℃	(二) 真空钎焊工艺 1) 钎料厚度 0.02mm; 2) 钎焊温度: 钎料液 相线温度以上 80℃; 3) 钎焊压力为 0.1MPa; 4) 钎焊时间 30min; 5) 真空度: $1 \times 10^{-3}$ Pa.	240	225
		BNi82CrSiBFe	1000℃		255	240
		BNi92SiB	1040℃		250	240
		BNi95SiB	1065℃		245	235
		BNi71CrSi	1135℃		240	230
Ti-46Al-4N b-0.6Cr-0.2 Ni -0.2Si(at%)	40Cr	BNi73CrFeSiB(C)	1060℃	(三) 感应钎焊工艺 1) 钎料厚度 0.2mm.2) 钎焊温度: 钎料液相 线温度以上 10℃; 3) 钎焊压力为 20MPa; 4) 钎焊时间 30 秒; 5) 通氩气进行惰性气体 保护焊。	245	235
		BNi82CrSiBFe	1000℃		240	230
		BNi92SiB	1040℃		255	235
		BNi95SiB	1065℃		250	235
		BNi71CrSi	1135℃		260	245
Ti-46Al-4N b-0.6Cr-0.2 Ni -0.2Si(at%)	35Cr-Mo	BNi73CrFeSiB(C)	1060℃	(一) 真空钎焊工艺 1) 钎料厚度 0.04mm; 2) 钎焊温度: 钎料液 相线温度以上 50℃; 3) 钎焊压力为 2MPa; 4) 钎焊时间 10min.5) 真空度: $1 \times 10^{-3}$ Pa.	265	255
		BNi82CrSiBFe	1000℃		250	240
		BNi92SiB	1040℃		255	245
		BNi95SiB	1065℃		260	245
		BNi71CrSi	1135℃		245	230