

TiAl 合金钎焊研究进展

关洪星¹, 杨海瑛², 毛小南², 李磊²

(1. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: TiAl 合金钎焊因具有无气体杂质、对母材力学性能影响小、钎料成分易控制等突出优点而被广泛应用。概述了 TiAl 合金的发展历程及其组织特点, 重点介绍了 TiAl 合金钎料种类以及钎焊工艺对焊接接头组织与性能的影响, 最后指出 TiAl 合金钎焊技术的发展方向: 加强焊接接头的动态试验研究, 如疲劳性能、冲击韧性及蠕变试验; 从扩散机理出发, 首先进行热力学和动力学分析, 再根据母材成分变化设计专用钎料; 进一步扩展 TiAl 合金钎焊技术的应用领域。

关键词: TiAl 合金; 钎焊技术; 钎料种类

中图分类号: TG457.19; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)06-043-06

Research Progress of TiAl Alloy Brazing

Guan Hongxing¹, Yang Haiying², Mao Xiaonan², Li Lei²

(1. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: TiAl alloy brazing is widely used because of its outstanding characteristics, such as no gas impurities, little influence on mechanical properties of the base metal, and easy control of solder composition. The development history and structure characteristics of TiAl alloy are described, with emphasis on the types of TiAl alloy brazing solders and the influence of brazing process on the structure and properties of welded joints. Finally, the development direction of TiAl alloy brazing technology is pointed out: strengthen the dynamic test research of welded joints, such as fatigue property, impact toughness and creep test; based on the diffusion mechanism, the thermodynamics and dynamics analysis are carried out first, and then the special solder is designed according to the change of the base metal composition; further expand the application field of TiAl alloy brazing technology.

Key words: TiAl alloy; brazing technology; types of solder

以 Ti₃Al、 γ -TiAl 为典型代表的 TiAl 系合金, 具有较高的比强度、比刚度和优良的抗蠕变、抗疲劳性能, 并且其密度仅为传统镍基高温合金的一半, 有望取代镍基高温合金在航空航天领域的应用^[1]。此外, 与钛合金相比, TiAl 系合金具有更好的高温机械性能和抗氧化性能、更大的刚度以及更高的使用温度^[2], 可以在 650~850 °C 下长期服役, 用其代替钛合金可以提高零部件的使用温度。为了实现

TiAl 系合金的工程应用, 需要解决 TiAl 系合金自身与异种材料的连接问题。TiAl 合金的焊接技术主要有熔焊、扩散焊和钎焊。Hirose 等^[3]对 Ti-46Al-2Mo 合金进行激光焊接, 发现焊缝开裂与冷却速度密切相关, 冷却速度越大, 开裂的可能性越大。Chaturvedi 等^[4]采用电子束焊研究了 Ti-45Al-2Nb-2Mn + 0.8TiB₂ 合金的可焊性。结果表明, 当焊接工件受到较多的约束时, 相变的作用被焊缝约束引起的应力所掩盖, 从而使焊接变得非常困难; 当焊接工件受到较少的约束时, 选择合适的焊接冷却速度, 使 α 相完全分解, 可以获得令人满意的焊接效果。Cao 等^[5]提出,

收稿日期: 2022-05-05

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2020ZDLGY01-08)

通信作者: 关洪星(1996—), 男, 硕士研究生。

TiAl 合金扩散焊工艺复杂、热循环时间长,在一定程度上限制了其应用。真空钎焊具有无杂质气体污染、焊件变形小、对母材力学性能影响小、可以连接复杂结构^[6]、可同时焊接大量工件等优点,因此真空钎焊被认为是连接 TiAl 合金的理想工艺^[7]。本文总结了 TiAl 合金的发展历程、组织转变过程及 TiAl 合金钎焊的研究进展,以供后续研究人员参考借鉴。

1 TiAl 合金

1.1 TiAl 合金的发展

自 20 世纪 90 年代中期以来,人们对 TiAl 合金的研究兴趣日益增加^[8]。TiAl 合金具有耐腐蚀、耐热、耐高温蠕变、高硬度、低密度和抗氧化性高的特点,能够有效克服常规高温钛合金在 600~1000 °C 这一温度区间内抗氧化性差和镍基高温合金密度大的缺点,因而在航空发动机领域有着广阔的应用前景。

到目前为止, TiAl 合金的发展历程主要历经了 4 代^[9]。20 世纪 50 年代初,部分美国学者对 TiAl 合金进行了相关研究,但因其塑性较低而放弃。第一代 TiAl 合金是在 20 世纪 70 年代产生的,它的特点是 Al 含量高、合金元素含量低,主要代表为室温塑性可达 2% 的 Ti-48Al-1V-0.3C 合金。美国在 20 世纪 80 年代开发了 Ti-48Al-2Cr-2Nb 和 Ti-45Al-2Mn-2Nb-0.8vol%TiB₂ 合金,即第二代 TiAl 合金。第二代 TiAl 合金的综合性能明显优于第一代。第三代 TiAl 合金以高含量的第 3 组元为特点,主要包括 Nb、Ta、W、V、B、C、Cr、Mn、Mo 等元素。林均品等^[10]首先提出高 Nb-TiAl 合金,并认为增加 Nb 含量可以显著提高 TiAl 合金的高温抗氧化性能。此外,高含量的第 3 组元能够产生固溶强化作用,明显提高 TiAl 合金的抗蠕变性能以及高温力学性能。随着航空航天技术的高速发展,德国开发了第四代 TiAl 合金——Ti-47.5Al-5.5Nb-0.5W 合金^[11],主要应用于航空发动机、涡轮叶片及汽车发动机增压器涡轮等。

1.2 TiAl 合金的组织

经不同条件热处理后, TiAl 合金可得到全片层组织(FL)、近片层组织(NL)、双态组织(DP)、近 γ 组织(NG) 4 种不同的典型显微组织,如图 1 所示^[12-13]。表 1 为 TiAl 合金热处理温度与显微组织的关系。

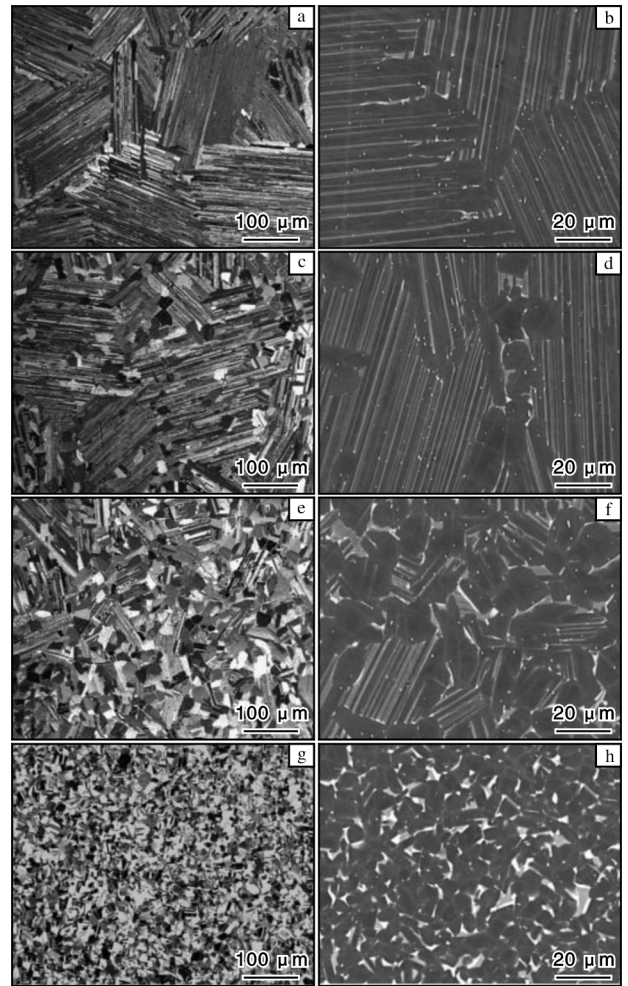


图 1 TiAl 合金的 4 种典型组织^[12-13]

Fig. 1 Four typical microstructures of TiAl alloy: (a, b) full lamellar; (c, d) nearly lamellar; (e, f) duplex; (g, h) near γ

表 1 TiAl 合金热处理温度与显微组织的关系

Table 1 Relation between heat treatment temperature and microstructure of TiAl alloy

Microstructure	Temperature	Morphology
Near γ (NG)	Slightly higher than T_{α}	γ equiaxed grain (most) and α_2 grain (few)
Duplex (DP)	$T_{\alpha} - 60$ °C	γ equiaxed grain (most) and α_2/γ lamellar cluster, 10~40 μm
Nearly lamellar (NL)	$T_{\alpha} - (10 \sim 20)$ °C	α_2/γ lamellar cluster (more, 200~500 μm) and γ grain (few)
Full lamellar (FL)	$T_{\alpha} + (10 \sim 20)$ °C	α_2 (5vol%~25vol%) and γ alternate overlays, 50~250 μm

T_{α} — α phase transition temperature.

根据 TiAl 合金二元局部相图^[14], 当热处理温度高于 T_{α} 时, 无论采用何种冷却方式(空冷或炉冷), 冷却过程中都会发生固态相变: $\alpha \rightarrow \alpha + \gamma_p \rightarrow L(\alpha/\gamma) \rightarrow L(\alpha_2/\gamma)$ ^[15], 最终获得全片层组织。通过 TiAl 合金相位变化规律可知, 冷却过程中 γ 相按照 Blackburn 位向关系 $(0001)_{\alpha} // \{111\}_{\gamma}$ 和 $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha} // \langle 1\bar{1}0 \rangle_{\gamma}$ 从 α 相中析出^[16]。在堆垛层错的形成条件下, 能够促进 γ 相的形核, γ 板条在 α 板条的两侧逐渐形成, α 板条和 γ 板条连续间隔排列构成层片组织。此外, 由于 α 板条和 γ 板条在同一晶粒中析出, 因此它们的层状组织取向相同。在随后的冷却过程中, α 相逐渐转变为 α_2 相, 并且形成粗大的 α_2/γ 片层状组织。这是因为热处理温度较高, 晶粒长大明显。在 T_{α} 以下 10 °C 附近(即 $(\alpha + \gamma)$ 双相区)热处理时, α 相中析出部分 γ 相。在随后的冷却过程中, 从 α 相中析出的 γ 相逐渐转化为 γ 晶粒, 而残留的 α 相则转变为片层组织。这样就形成了由细小 γ 晶粒包裹着片层组织而构成的近片层状组织。同时 γ 晶粒比较细小, 会阻碍 α 晶粒的长大, 从而导致 α 晶粒尺寸显著减小。当热处理温度在 T_{α} 以下 30 °C 时, 此时温度略高于共析转变温度, 凝固过程中 α 相并不会析出 γ 相, 而是转变为有序的 α_2 相, 然后 α_2 相中析出条状 γ 相, 随即形成层片状组织。在随后的冷却过程中, γ 相的含量不断增加, 由此导致 α 晶粒的长大变得更加困难, 此时 α 相和 γ 相竞相长大, 这使得双态组织的晶粒细化更加明显。当在共析转变温度以下热处理时, 组织由少量的 α_2 晶粒和大量的 γ 相组成, 这样的组织称为等轴 γ 单相组织。组织不同所表现出的性能也不同, 近 γ 组织的晶粒粗大, 没有片层组织, 因此塑性、韧性及强度都较低。室温下双态组织具有良好的延展性和强度, 但抗蠕变性能和断裂韧性很差; 全片层组织的抗蠕变性能和断裂韧性得到了显著改善; 近片层组织具有较高的强度和较好的塑性; 细小的全片层组织性能优异, 既具有良好的抗蠕变性能, 又有一定的强度。片层组织在形成过程中受到许多因素的影响, 如冷却速率、合金成分、热处理温度等。

2 TiAl 合金钎焊

2.1 钎料种类

用来钎焊 TiAl 合金的钎料主要分为钛基、铝基和银基三大类。钛基钎料主要包括 Ti-Cu、Ti-Cu-Ni、

Ti-Zr-Cu-Ni、Ti-Ni、Ti-Zr-Cu-Ni-Co-Mo 等, 该类钎料具有很高的焊接强度。银基钎料主要包括纯银、银铜共晶钎料等, 这类钎料既可以用于 TiAl 合金自身钎焊, 也可以用于 TiAl 合金与其他材料的钎焊, 焊接接头强度较高。铝基钎料主要用于 TiAl 合金自身钎焊, 与钛基和银基钎料相比, 焊接接头强度较低。表 2 给出了近年来 TiAl 合金钎焊所使用的钎料。

2.2 工艺参数对接头组织性能的影响

钎焊工艺参数(钎焊温度、保温时间)是影响焊接接头质量的重要因素, 合理的工艺参数是获得高质量焊接接头的关键。Song 等^[17]采用 Ti-28Ni 共晶钎料在 1100 °C 下钎焊高 Nb 含量的 TiAl 合金(Ti-45Al-8.5Nb-(W, B, Y) (at%)), 研究了保温时间对焊接接头界面微观结构和连接强度的影响。结果表明, 熔融钎料合金中的 Ni 元素向基体的扩散程度直接影响界面组织; 随着保温时间的延长, 扩散区逐渐增加, 焊缝区域逐渐减少。当保温时间为 15 min 时, 焊接接头在室温和 600 °C 下的最大剪切强度分别为 248.6、166.4 MPa。断裂分析表明, 在剪切试验过程中, 焊接接头的脆性断裂更倾向于在连续的金属间化合物层中产生和扩展。

Song 等^[18]使用 TiNi-V25 (at%) 钎料钎焊 TiAl 合金, 得到了强度可靠的焊接接头。TiAl 合金焊接接头主要由 B2 相和 τ_3 -Al₃NiTi₂ 金属间化合物组成, 其界面形貌随着钎焊温度的升高而变化, 但相组成没有发生改变。在钎焊温度为 1220 °C、保温时间为 10 min 的条件下钎焊时, 可获得剪切强度达到 196 MPa 的良好接头。断口分析表明, 在剪切试验过程中形成了河流状花样, 为解理断裂; 裂纹萌生和扩展始终发生在 τ_3 -Al₃NiTi₂ 金属间化合物含量较高的部位。

Cai 等^[19]选用 Ti-37.5Zr-15Cu-15Ni (wt%) 非晶钎料钎焊 TiAl 合金, 系统研究了钎焊温度和保温时间对焊接接头显微组织和性能的影响。在钎焊温度 910 ~ 1010 °C、保温时间 30 min 条件下, 焊接接头的室温抗拉强度随钎焊温度升高呈现出先升高后降低的趋势。当钎焊温度为 930 °C 时, 焊接接头的室温抗拉强度随着钎焊保温时间的延长而增加。在 930 °C 下钎焊 60 min 时, 焊接接头在室温下的最大抗拉强度达到 468 MPa, 所有断裂面均呈现出典型的脆性解理断裂特征。

表 2 不同 TiAl 合金钎料的特性

Table 2 Characteristics of different TiAl alloy solders

Type of solders	TiAl alloy	Brazing temperature/°C	Holding time/s	Joint strength/MPa	Reference
Ti28Ni	Ti45Al8.5Nb-(W, Y, B) (at%)	1100	900	249 (Shear)	[17]
Ti37.5Ni25V	Ti42.5Al9V0.3Y (at%)	1220	600	196 (Shear)	[18]
Ti37.5Zr15Cu15Ni	Ti45Al2Mn2Nb1B (at%)	930	3600	468 (Tensile)	[19]
	Ti22Al25Nb (at%)	975	600	855 (Tensile)	[20]
	Ti48Al2Cr2Nb (at%)	1100 ~ 1200	30 ~ 60	319 ~ 322 (Shear)	[21]
Ti-15Cu-15Ni	Ti48Al2Cr2Nb (at%)	950	900	295 (Tensile)	[22]
	Ti33.5Al0.5Cr1Nb0.5Si (wt%)	1075	30	260 (Tensile)	[23]
Ti-28Ni	Ti45Al8.5Nb-(W, B, Y) (at%)	1080	600	139 (Shear)	[24]
Ti-Ni	Ti47Al2Cr2Nb (at%)	1100 ~ 1200	600	—	[25]
Ag-Cu-Ti	Ti46Al2Cr2Nb (wt%)	900	600	426 (Tensile)	[26-27]
B-Ag72Cu	Ti46.5Al5Nb (at%)	870	1200	—	[28]
Ag-Cu with Ti	Ti47Al (at%)	800	60	294 (Tensile)	[29]
Pure Al	Ti34Al (wt%)	900	600	220 (Tensile)	[30]
Ti-15Cu-15Ni	Ti46Al4(Cr, Nb, B) (wt%)	1040	600	230 (Shear)	[31]
Ti37.5Zr15Ni10Cu-(Mo)	Ti43Al9V0.3Y (at%)	980	1200	218 (Shear)	[32]
Pure Ag	Ti 50Al 50 (at%)	1100	60	385 (Shear)	[33]

Shiue 等^[33]使用纯 Ag 钎料对 TiAl 合金进行感应钎焊。结果表明,焊缝中主要为 Ag 基固溶体,同时固溶了少量的 Ti 和 Al (Al 含量大于 Ti 含量),此外还生成了少量 Ti₃(Al, Ag)金属间化合物;焊接接头的室温抗剪强度较高,达到 385 MPa。

宋晓国等^[34]使用 Ni-34Ti 钎料焊接 Ti-Al 合金,研究了钎焊工艺参数对焊缝质量的影响。结果表明,随着钎焊温度的不断升高,热影响区(I区)宽度逐渐增加,焊缝区(II区)宽度逐渐减少,如图 2 所示。在 1180 °C 保温 10 min 的钎焊条件下, Ti-Al 合金焊接接头的室温抗剪强度最大,为 87 MPa;焊接接头界面组织中无气孔和裂纹等缺陷,并且整个焊接接头呈现出对称特征。

Dong 等^[35]使用 Ti₂₀Zr₂₀Hf₂₀Cu₂₀Ni₂₀ 高熵非晶钎料对 TiAl 合金和 Ni 基合金进行真空钎焊。结果表明,在高温条件下形成了环状固溶体,随着钎焊温度的降低,固溶体中析出细小的金属间化合物,并对焊接接头产生沉淀强化作用;当钎焊温度为 960 °C 时,焊接接头的最大剪切强度为 319 MPa,接头断裂方式是以塑性断裂为主的混合断裂,并且固溶相在断裂过程中承受了大部分的塑性变形。

Kokabi 等^[36]用 Ti₃₄Zr₂₆Ni₁₈Cu₁₅Co₇ 高熵合金钎焊

TiAl 合金和 IN718 合金。研究表明,钎焊焊缝中形成了大量的固溶体,从而提高了焊接接头的力学性能;在钎焊温度 1020 °C、保温时间 40 min 条件下,焊接接头的最大抗剪强度达到 396 MPa。

Sun 等^[37]使用 TiZrHfCoNiCu 钎料钎焊 TiAl 和 Ti₂AlNb 合金,深入研究了钎焊温度对组织和力学性能的影响。结果表明,在 1050 ~ 1100 °C 范围内,焊接接头的室温和高温剪切强度均随钎焊温度的升高而增加;在钎焊温度 1100 °C、保温时间 15 min 条件下,焊接接头的室温和高温(650 °C)剪切强度最大,分别为 157、123 MPa。

以上研究表明,钎焊 TiAl 合金时,钎焊温度和保温时间是影响焊接接头力学性能的重要因素。一般来说,焊接接头强度随着钎焊温度和保温时间的变化会出现一个最大值,即最佳的钎焊工艺参数。这是因为钎焊温度、保温时间从根本上决定了钎焊组织,而组织决定着焊接接头的最终力学性能。此外,在焊接接头处往往会形成新的金属间化合物,产生应力集中,影响焊接接头的连接质量。近年来,国外学者热衷于研究高熵合金钎料,其特点是倾向于形成固溶体相,这种多元素混合而成的固溶体相有利于抑制脆性金属间化合物的形成,尤其是在高

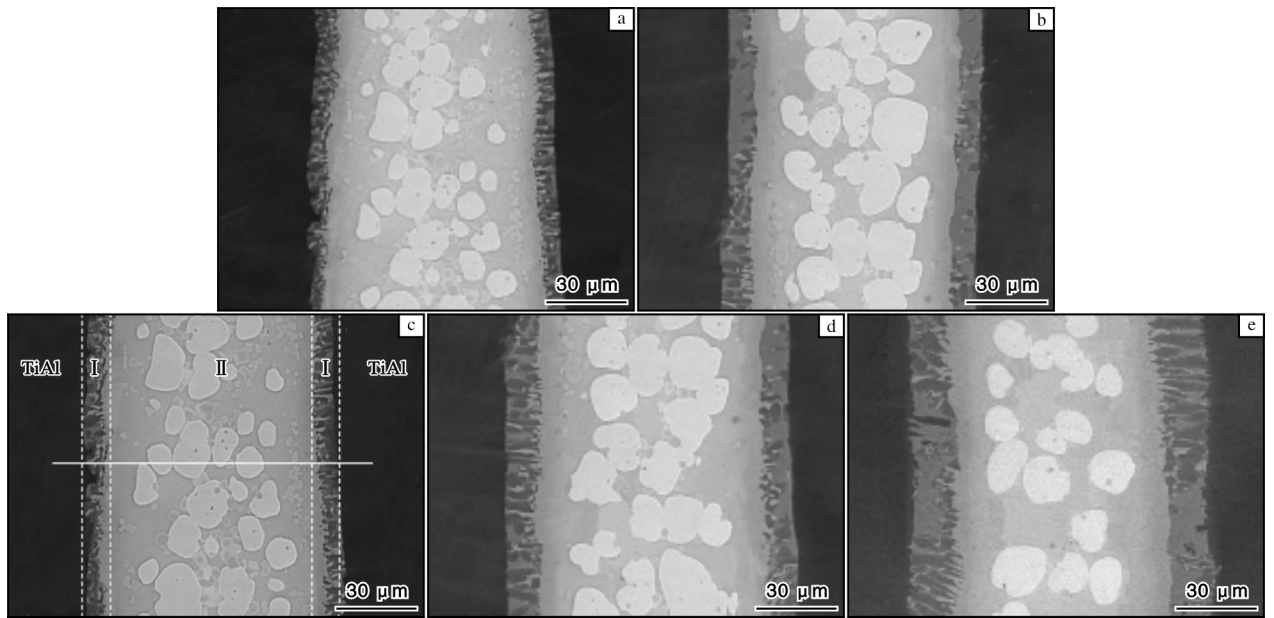


图2 不同钎焊温度下 TiAl 合金焊接接头的显微组织^[34]

Fig. 2 Microstructures of TiAl alloy brazed joints at different brazing temperatures: (a) 1140 °C; (b) 1160 °C; (c) 1180 °C; (d) 1200 °C; (e) 1220 °C

温条件下。此外,高熵合金中的原子扩散缓慢,易形成过饱和相和细小分散的沉淀物,从而增强焊接接头的力学性能^[38]。因此,我国今后也应加强对高熵合金钎料的研究。

3 结 语

钎焊是连接 TiAl 合金的重要方法之一,在 TiAl 合金钎焊时要充分考虑焊接接头金属间化合物的控制、钎料种类的选择及钎焊工艺的确定,以便得到最佳性能。目前,针对焊接接头的性能测试主要是静态性能(抗拉、剪切),然而使用过程中零部件的断裂与高频疲劳性能的相关性更大,所以对焊接接头性能的测试应更加侧重动态试验,如疲劳性能、冲击韧性及蠕变试验。对于 TiAl 合金的钎焊试验,一般使用商用钎料,且试验结果往往因人而异,差异较大。建议从扩散机理出发,通过热模拟原子扩散过程进行热力学和动力学分析,再根据母材成分变化设计专用钎料。另外,还应进一步拓展 TiAl 合金钎焊技术的应用领域,如海洋工程、生命健康等领域。

参考文献 References

[1] 任海水,熊华平,吴欣,等. 钛铝系合金与镍基高温合金异种连接技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 1-10.

[2] 吴爱萍,邹贵生,任家烈. Ti_3Al 合金的发展现状及其连接技术[J]. 航空制造技术, 2007(6): 30-35.

[3] Hirose A, Arita Y, Kobayashi K F. Microstructure and crack sensitivity of laser-fusion zones of Ti-46mol% Al-2mol% Mo alloy[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(4): 970-979.

[4] Chaturvedi M C, Xu Q, Richards N L. Development of crack-free welds in a TiAl-based alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118(1/2/3): 74-78.

[5] Cao J, He P, Wang M. Mechanical milling of Ti-Ni-Si filler metal for brazing TiAl intermetallics [J]. Intermetallics, 2011, 19(7): 855-859.

[6] Liu S L, Miao J K, Zhang W W, et al. Interfacial microstructure and shear strength of TC4 alloy joints vacuum brazed with Ti-Zr-Ni-Cu filler metal [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 775(1/2/3): 138990.

[7] Yang Z W, Peng H, Zhang L X, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of the joint of TiAl alloys and C/SiC composites vacuum brazed with Ag-Cu filler metal [J]. Materials Characterization, 2011, 62(9): 825-832.

[8] Mirski Z, Rógański M. Diffusion brazing of titanium aluminide alloy based on TiAl(γ)[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2013, 13(4): 415-421.

[9] 宋志文. β - γ TiAl 合金高温轧制的变形机制及组织演变研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.

[10] 林均品, 陈国良. TiAl 基金属间化合物的发展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(1): 31-37.

- [11] Reith M, Franke M, Schloffer M, et al. Processing 4th generation titanium aluminides via electron beam based additive manufacturing-characterization of microstructure and mechanical properties[J]. *Materialia*, 2020, 14: 1-10.
- [12] Appel F, Wagner R. Microstructure and deformation of two-phase γ -titanium aluminides [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 1998, 22(5): 187-268.
- [13] Mercer C, Soboyejo W O. Hall-petch relationships in gamma titanium aluminides[J]. *Scripta Materialia*, 1996, 35(1): 17-22.
- [14] Schuster J C, Palm M. Reassessment of the binary aluminum-titanium phase diagram[J]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2006, 27(3): 255-277.
- [15] Kim Y W. Microstructural evolution and mechanical properties of a forged gamma titanium aluminide alloy [J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1992, 40(6): 1121-1134.
- [16] Jaffee R I, Promisel N E. *The Science, Technology and Application of Titanium* [M]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1970: 633-642.
- [17] Song X G, Si X Q, Cao J, et al. Microstructure and joining properties of high Nb-containing TiAl alloy brazed joints [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(1): 52-58.
- [18] Song X G, Cao J, Chen H Y, et al. Brazing TiAl intermetallics using TiNi-V eutectic brazing alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 551: 133-139.
- [19] Cai Y S, Liu R C, Zhu Z W, et al. Effect of brazing temperature and brazing time on the microstructure and tensile strength of TiAl-based alloy joints with Ti-Zr-Cu-Ni amorphous alloy as filler metal[J]. *Intermetallics*, 2017, 91: 35-44.
- [20] 侣好学, 静永娟, 岳喜山, 等. Ti_2AlNb 合金的钎焊试验研究[J]. *航空制造技术*, 2015(S1): 1-3.
- [21] Lee S J, Wu S K. Infrared joining strength and interfacial microstructures of Ti-48Al-2Nb-2Cr intermetallics using Ti-15Cu-15Ni foil[J]. *Intermetallics*, 1999, 7(1): 11-21.
- [22] 韩明, 康慧, 曲平. Ti-15Cu-15Ni 真空钎焊 TiAl 合金 [J]. *航天制造技术*, 2004(4): 22-24.
- [23] Noda T, Shimizu T, Okabe M, et al. Joining of TiAl and steels by induction brazing[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1997, 239-240: 613-618.
- [24] 彭赫力, 咎林, 包潘飞, 等. 保温时间对 Ti-28Ni 钎料钎焊连接 Ti60/高镍 TiAl 合金接头的影响研究[J]. *上海航天*, 2017, 34(6): 70-75.
- [25] Guedes A, Pinto A M P, Vieira M F, et al. Joint Ti-47Al-2Cr-2Nb with a Ti-Ni braze alloy [J]. *Materials Science Forum*, 2004, 455-456: 880-884.
- [26] 薛小怀, 吴鲁海, 茅及放, 等. TiAl 合金与 40Cr 钢的真空钎焊研究[J]. *航空材料学报*, 2003, 23(S1): 136-138.
- [27] 张轲, 吴鲁海, 楼松年, 等. TiAl/40Cr 的扩散钎焊[J]. *焊接*, 2002(10): 35-38.
- [28] 高强, 郭建亭, 刘午, 等. TiAl 合金与 42CrMo 扩散钎焊的界面组织及形成机理 [J]. *航空材料学报*, 2003, 23(S1): 51-54.
- [29] Koo J M, Lee W, Kim D U, et al. Induction brazing of γ -TiAl to alloy steel AISI 4140 using filler metal of eutectic Ag-Cu alloy coated with Ti film[J]. *Materials Transactions*, 2005, 46(2): 303-308.
- [30] Uenishi K, Sumi H, Kobayashi K F. Joining of intermetallic compound TiAl by using Al filler metal [J]. *Zeitschrift für Metallkunde*, 1995, 86(4): 270-274.
- [31] Wallis I C, Ubhi H S, Bacos M P, et al. Brazed joints in γ TiAl sheet; microstructure and properties [J]. *Intermetallics*, 2004, 12(3): 303-316.
- [32] Qiu Q W, Ying W, Yang Z W, et al. Microstructure and mechanical properties of TiAl alloy joints vacuum brazed with Ti-Zr-Ni-Cu brazing powder without and with Mo additive [J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 650-659.
- [33] Shiue R K, Wu S K, Chen S Y. Infrared brazing of TiAl intermetallic using pure silver [J]. *Intermetallics*, 2004, 12(7): 929-936.
- [34] 宋晓国, 司晓庆, 倪浩晨, 等. Ni-34Ti 钎料钎焊 TiAl 合金接头界面结构及性能 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(7): 13-16.
- [35] Dong K W, Kong J, Peng Y, et al. A new strategy for high-strength joining of dissimilar materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 283: 116724.
- [36] Kokabi D, Kafrou A. TiAl/IN718 dissimilar brazing with TiZrNiCuCo high-entropy filler metal; phase characterization and fractography [J]. *Welding in the World*, 2021, 65(6): 1189-1198.
- [37] Sun Z, Zhu X X, Chen H Z, et al. Brazing of TiAl and Ti_2AlNb alloys using high-entropy braze fillers [J]. *Materials Characterization*, 2022, 186: 111814.
- [38] Gao M C, Liaw P K, Yeh J W, et al. *High-entropy Alloys: Fundamentals and Applications* [M]. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland, 2016: 342-378.