

中间层材料对 TiAl 合金与 42CrMo 钢摩擦焊接头性能的影响研究

李娜^{1,2}, 杜随更¹, 王晋伟³

(1. 西北工业大学 航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 平凉职业技术学院 机电工程系, 甘肃 平凉 744000)

(3. 中国北方发动机研究所, 山西 大同 037036)

摘要: TiAl 合金与 42CrMo 直接摩擦焊接性较差, 为此分别引入高温合金 GH3039、K418、N80A 和纯镍 N6 作为中间材料, 对 TiAl-GH3039/K418/N80A/N6-42CrMo 异种材料的摩擦焊接工艺进行了研究。采用硬度计、扫描电镜和电子万能试验机对焊后接头区域的硬度、组织和焊合区成分变化以及接头力学性能进行了分析。研究表明, TiAl 合金与异种材料焊后接头中形成了复杂的多层状金属间化合物; TiAl 合金与 GH3039、N80A 的摩擦焊接性较好, 与 K418、N6 的摩擦焊接性较差; 根据不同材料线膨胀系数随温度的变化规律、与 TiAl 合金摩擦焊接后接头的性能及其与 42CrMo 的摩擦焊接性, 最终选择 GH3039 作为中间材料。通过引入中间材料, 摩擦焊制备了 TiAl 合金涡轮-42CrMo 转轴的异种材料整体转子, 使得 TiAl 合金在涡轮增压器领域的应用成为可能。

关键词: TiAl 合金; 42CrMo; 摩擦焊接; 异种材料

中图分类号: TG453+.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)07-2519-06

目前, 传统涡轮增压器采用的是 K418 涡轮与结构钢转轴结构, 这种结构的缺点是涡轮材料密度高, 整体质量大, 导致转子系统的转动惯量大。为了解决该问题, 减轻涡轮质量, 就需要寻找 K418 的替代材料^[1-4]。TiAl 合金具有低密度、高强度、良好的高温力学性能及抗氧化性等优点, 适用于发动机高温隔热、运动部件的制造。研究表明, TiAl 合金代替铸造镍基高温合金制造增压涡轮可使涡轮转子减重 50% 以上, 同时发动机加速响应时间也显著减少。这对改善发动机的加速瞬态响应特性, 减少燃烧不充分所导致的废气污染量等有重要意义^[5-6]。

TiAl 合金涡轮增压器制造的关键技术之一是 TiAl 合金涡轮与结构钢转轴的连接。研究发现, TiAl 合金异种材料的熔焊焊接性较差, 焊接热裂倾向严重, 焊后接头质量较差^[7-9], 而固态焊接方法能够避免在熔焊过程中出现的与熔化和凝固有关的一些焊接缺陷, 显示出良好的应用前景。其中, 摩擦焊接是一种典型的固态焊接技术, 具有焊接效率高、焊接性好、环保、无污染等优点^[10]。

Miyashita 等^[11]对 TiAl 合金进行了摩擦焊接, 发现焊后接头内有大量的显微裂纹, 接头抗拉强度为 560 MPa。Xu 等^[12-13]对高镍 TiAl 合金进行了摩擦焊接, 发现过渡

区由变形的层状晶粒和部分再结晶晶粒组成, 且接头的拉伸性能优于母材。Ventzke 等^[14]研究了 TiAl 合金和 Ti6Al4V 的摩擦焊接, 指出焊接前后热处理是必须的, 接头抗拉强度主要取决于 TiAl 合金母材而不是连接界面。Lee 等^[15]对 TiAl 合金和 AISI4140 钢进行了摩擦焊接, 发现引入纯 Cu 可改善二者的摩擦焊接性, 焊后接头抗拉强度可达到 375 MPa。Park^[16-17]等研究了 TiAl/Cu/SCM440 和 TiAl/Ni/SCM440 摩擦焊接接头的微观结构和力学性能, 发现焊接界面的结构取决于中间层金属的类型, 并且金属间化合物 (IMC) 层的厚度随摩擦时间的变化而变化。Kumar^[18]引入无氧铜 (OFC) 作为夹层研究了 Ti-6Al-4V 和 SS304L 的摩擦焊接特性, 接头最高抗拉强度达 523.6 MPa。Dong 等^[19-20]研究了热处理对 TiAl 合金与 40Cr 及 40CrMo 钢摩擦焊接头显微组织及力学性能的影响, 发现经过热处理, 接头的抗拉强度大幅提高。

现有研究发现 TiAl 合金与 42CrMo 的焊接性较差, 直接焊接很难获得优质的接头, 加入中间材料有望改善它们的焊接性。拟选用 GH3039、K418、N80A 和纯镍 N6 为中间材料, 对 TiAl-GH3039/K418/N80A/N6-42CrMo

收稿日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51675434)

作者简介: 李娜, 女, 1988 年生, 讲师, 西北工业大学航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 陕西 西安 710072, E-mail: linasyt@163.com

异种材料摩擦焊接工艺进行分析, 以期优选出合适的中间材料, 解决 TiAl 涡轮与结构钢转轴连接的关键技术, 促进 TiAl 合金在涡轮增压器制造中的推广应用。

1 实验

1.1 实验材料

试验所用 TiAl 合金通过真空感应悬浮熔炼工艺制备, 试棒采用金属模具浇注, 其化学成分见表 1。铸态合金组织为两相成束平行排列的层片状组织, 铸态一次凝固组织基本由沿散热方向长大的柱状晶构成。

TiAl 合金与 42CrMo 摩擦焊接时, 引入中间材料可获得较好的接头。综合考虑, 中间材料的选择应满足以下条件: (1) 兼顾 TiAl 与 42CrMo 的物理、化学性能; (2) 所含的微量元素可以改善 TiAl 的塑性; (3) 能有效地阻碍接头界面处脆性相的形成。

按照以上要求, 初步选取高温合金 GH3039、K418、N80A 以及纯镍 N6 作为中间材料, 其化学成分如表 2 所示。选择这 4 种材料是因为:

表 1 TiAl 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of TiAl alloy (at%)

Al	Cr	V	Ti
47	1.0	2.5	Bal.

表 2 中间材料主要化学成分

Table 2 Main chemical compositions of intermediate materials (wt%)

Material	Cr	Al	Ti	Fe	Mo	Nb	Ni
GH3039	19-22	0.35-0.75	0.35-0.75	≤3.0	1.8-2.3	0.9-1.3	Bal.
K418	11.5-13.5	5.5-6.4	0.5-1.0	≤1.0	3.8-4.8	1.8-2.5	Bal.
N80A	18-21	1.0-1.8	1.8-2.7	≤1.5	-	-	Bal.
N6	-	-	-	0.1	-	-	Bal.

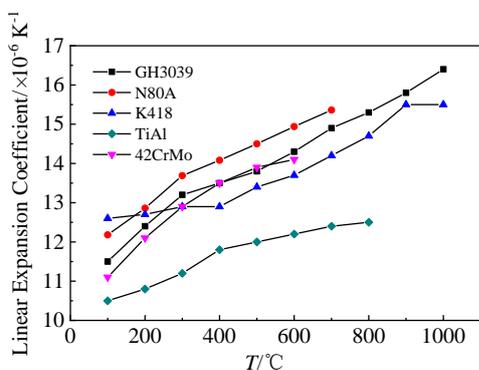


图 1 材料的线膨胀系数随温度变化规律

Fig.1 Variations of linear expansion coefficients with temperature

(1) 镍基高温合金中的 Ni 可以固溶大量的 Fe、Cr、V、Ti、Al, 与 TiAl 的摩擦焊接性相对较好;

(2) GH3039 的高温性能随温度的变化规律与 TiAl 较为匹配;

(3) K418 是传统涡轮最常用的材料;

(4) N80A 的强度高、塑性好;

(5) N6 元素单一, 焊后界面组织结构简单;

(6) 镍基高温合金与 42CrMo 有较好的摩擦焊接性。

所选材料的线膨胀系数随温度的变化规律如图 1 所示。由图可以看出, TiAl 合金的线膨胀系数最低, 与其它材料相差较大, 焊后接头中容易出现残余应力; GH3039 的线膨胀系数与 42CrMo 接近, 与 TiAl 的变化规律相近, 比 N80A 更接近 TiAl。

焊接所用试样均为圆棒, 焊前将试样端面车削平整, 并用丙酮清洗端面。

1.2 焊接设备

本试验采用西北工业大学研制的 C500 型连续驱动数控摩擦焊机进行焊接, 该焊机配备有工业控制计算机闭环控制系统, 能实现焊接过程参数的实时检测、显示和控制, 主轴转速无级调节。

1.3 接头组织分析方法及仪器

焊后采用 FM-800 型显微维氏硬度计对接头区域的

宏观硬度进行测试 (载荷 100 g, 加载时间 10 s); 采用 DDL300 电子万能试验机对焊接接头的抗拉强度进行测试 (加载速度为 0.5 mm/min); 采用 Quanta FEG400 场发射扫描电子显微镜对焊接接头界面组织结构进行观测, 确定反应界面结构和形态。

沿焊接接头纵向横截面取样, 不同材料使用不同的腐蚀剂进行腐蚀 (表 3)。

2 结果与讨论

2.1 焊接接头的宏观形貌分析

TiAl 合金分别与高温合金 GH3039、K418、N80A

表 3 不同材料试样所用的腐蚀剂

Table 3 Corrosive agents for different materials samples

Sample	TiAl alloy	GH3039	K418/N80A/N6
Corrosive agents	5% HF+10% HNO ₃ +85% H ₂ O	HNO ₃ :HCl=1:3	20 mL HCl+4 g CuSO ₄ +100 mL H ₂ O

和纯镍 N6 的焊后接头的剖面宏观形貌如图 2 所示。可以看出，焊接接头的形貌差异较大。由于 TiAl 合金的高温强度远高于 GH3039 和 N6，焊后 TiAl 端几乎无宏观塑性变形。当摩擦加热到 GH3039 和 N6 的热塑性阶段，TiAl 合金依然保持了较高的高温强度，并且 TiAl 合金为铸态组织，不易发生塑性变形，在摩擦压力的作用下，GH3039 及 N6 的摩擦塑性变形不断发展，顶锻后形成单侧飞边（如图 2a 和图 2d 所示）。TiAl 合金和 K418、N80A 的高温性能相当，摩擦焊接后 TiAl 和 K418 的塑性变形都很小，双侧均未产生飞边，仅在摩擦界面处产生了一定程度的径向墩粗（图 2b）；而 N80A 一侧产生了均匀光滑的小飞边，TiAl 一侧则未产生飞边，仅有微小的塑性变形（图 2c）。从以上产生飞边的情况来

看，由于 N80A 与 TiAl 合金焊后接头两侧均形成了飞边，因而焊接表面自清理作用效果更好一些。

2.2 焊接接头的硬度分析

对 TiAl 合金与异种材料焊接截面沿轴线进行了硬度测量，结果如图 3 所示。可以看出，GH3039、N80A 母材硬度与 TiAl 合金相当，而 K418 母材硬度高于 TiAl 合金，N6 则相反。两侧母材硬度相差小，焊接接头拉伸变形时不易在焊合区形成应变集中。因此，从母材硬度差别的角度来分析，GH3039、N80A 与 TiAl 合金摩擦焊接头的塑性比 K418、N6 与 TiAl 合金摩擦焊接头的更好一些。

此外，除了 N6-TiAl 焊接界面外，TiAl 与其它 3 种高温合金焊接界面处的硬度均显著高于母材，表明在焊

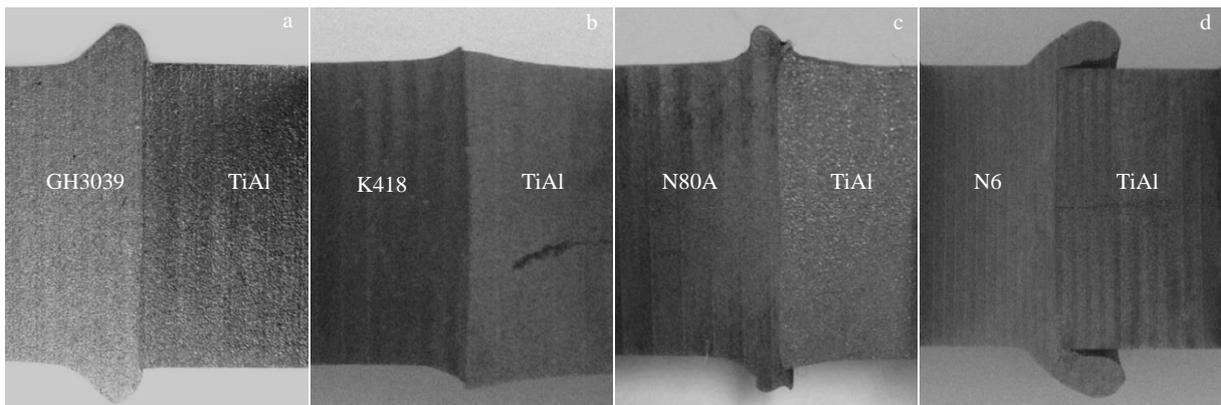


图 2 TiAl 合金与异种材料焊接接头的剖面形貌

Fig.2 Profiles of welded joints of TiAl alloy and dissimilar materials

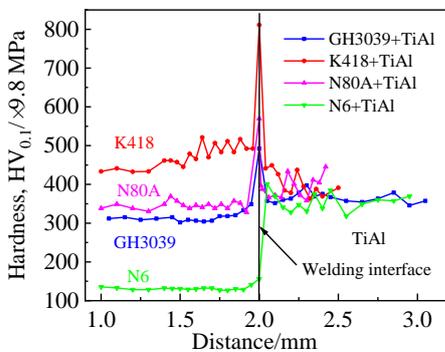


图 3 TiAl 合金与异种材料焊缝截面硬度分布

Fig.3 Hardness distribution of welding seam section of TiAl alloy and dissimilar material

后界面处形成了高硬度的第二相。K418-TiAl 焊接界面处硬度达到 7840 MPa，N80A-TiAl 焊接界面处硬度约为 5586 MPa，GH3039-TiAl 焊接界面处硬度约为 4704 MPa。若界面上的第二相硬度太高，必然会降低接头塑性。因此根据界面硬度的分布情况可知，GH3039 与 TiAl 合金摩擦焊接头的塑性比 K418、N80A 与 TiAl 合金焊接接头的更好一些。

2.3 焊接接头的微观组织分析

摩擦焊接过程中，由于焊接接头不同位置的热循环不同，距离界面越近，温度越高，会导致异种材料焊接界面和其热力影响区（HMAZ）化学成分及微观组织变化复杂。此外，摩擦焊接是物理作用和化学变化共同作

用的过程,存在金属的塑性变形、动态再结晶、元素扩散和机械混合等现象,焊接接头的微观组织受冶金与机械力两方面的影响。由于接头的微观组织对接头的性能有显著影响,对 TiAl 合金与异种材料焊接界面处的微观组织进行了 SEM 观察,结果如图 4 所示。可以看出,除 TiAl 与 N6 焊接界面外,TiAl 与高温合金 GH3039、K418、N80A 焊接界面焊合良好,未观测到裂纹、气孔等焊接缺陷。整体来看,在焊接界面附近,两侧合金元素均发生了扩散,由于元素扩散程度不同,界面有明显的分层现象,形成了不同宽度的焊合区;由于原子半径、价电子浓度不同,主要合金元素 Ti、Al、Ni、Cr 的浓度变化范围大,易于形成金属间化合物,生成不同的中间反应相层,构成复杂的焊合区域组织。

TiAl 合金与 GH3039 焊后形成一个宽度约为 12 μm 的焊合区(图 4a)。从焊合区开始,GH3039 侧元素 Ni 含量逐步降低,而 Cr 元素含量先降低后升高,说明在焊合区内形成了富 Cr 的第二相。TiAl 侧主要元素 Ti 和 Al 的含量在焊合区左侧存在一段平台区域,说明该位置有新相生成。在焊合区域靠近右侧边界的位置 Ni 和 Cr 含量显著下降,Ti 和 Al 元素含量突增,直至过渡到 TiAl 母材。不同相层之间界限分明,呈刺状彼此交叉在一起。相层内部成分比较均匀,但相层界面并不是和焊缝完全平行,即焊合区不同位置的相层宽度是不同的。这主要是因为不同材料的热物理性质、力学性能和化学成分有所差异,在焊接界面温度和应力分布呈不均匀性,并且焊接过程中各个元素的活性及扩散程度不同,当元素浓度达到临界值后,

会产生不同的金属间化合物相区。TiAl 合金与 K418 焊接界面区的相组成复杂,不同反应层之间相互嵌入、交错,形成一个宽度约为 30 μm 的焊合区,靠近 K418 一侧深灰色颗粒相弥散分布在浅灰色基体上,同时有较多的白色块状化合物分布其中(图 4b)。TiAl 与 N80A 焊后界面组织与 GH3039 相似(图 4c)。TiAl 与 N6 摩擦焊接后,焊接界面处形成了宽度约为 3 μm 的焊合区,元素发生了小幅扩散,N6 一侧焊缝附近有气孔、未熔合等缺陷,由于摩擦焊接过程中热力耦合的作用,部分碎化的中间层被剥落,嵌入到较软的 N6 一侧母材中,使得靠近焊缝区域的 N6 成分不均,焊接界面状况较差(图 4d)。

2.4 焊接接头的强度分析

通过多组工艺试验,对比了 TiAl 合金分别与高温合金 GH3039、K418、N80A 和纯镍 N6 摩擦焊接后接头的力学性能。取各组试验结果中的性能最优值,结果如表 4 所示。可以看出,相比于 K418 和 N6,TiAl 合金试棒与 GH3039 和 N80A 的焊接强度更好,均达到 400 MPa 以上,且断口位于 TiAl 合金母材一侧。

综合考虑上述不同中间材料的线膨胀系数随温度的变化规律、接头飞边形貌、接头硬度分布、接头拉伸性能,以及焊合区组织与成分变化规律,最终选取 GH3039 作为中间材料。

2.5 TiAl 涡轮与 GH3039、42CrMo 的三体摩擦焊接

试验表明,GH3039 与结构钢 42CrMo 具有较好的摩擦焊接性,焊后接头的抗拉强度达到 700 MPa 以上。对接头横截面心部的硬度进行了测量,结果如图 5 所示。

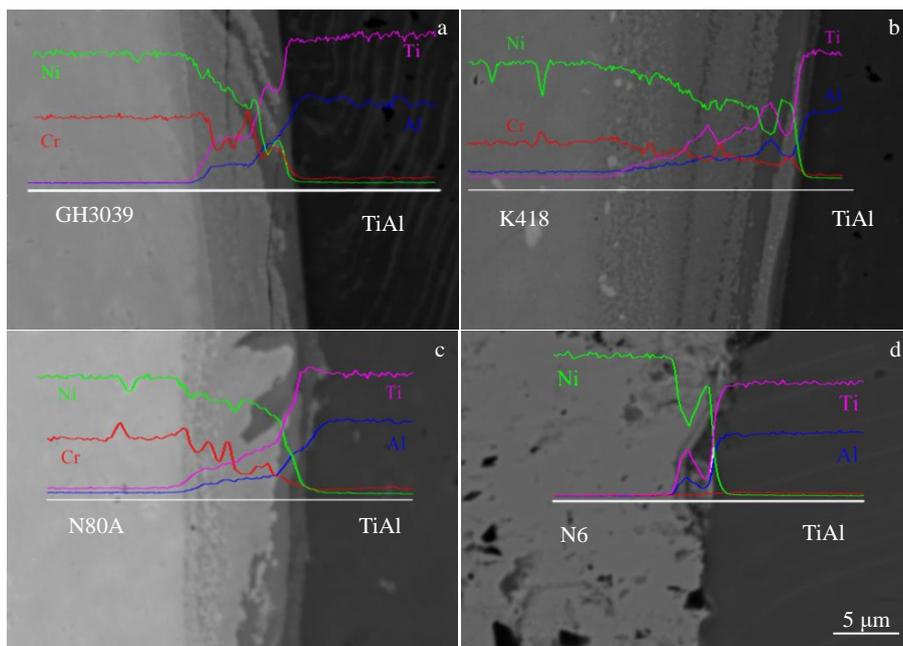


图 4 TiAl 合金与不同材料的焊接接头界面 SEM 组织及 EDS 元素线扫描

Fig.4 SEM microstructures and EDS line scanning of welded joint interfaces of TiAl alloy and different materials

表 4 TiAl 合金与异种材料焊接接头的抗拉强度

Table 4 Tensile strength of welded joint between TiAl alloy and dissimilar materials

Material	Tensile strength/MPa
TiAl+GH3039	412
TiAl+K418	234
TiAl+N80A	491
TiAl+N6	204

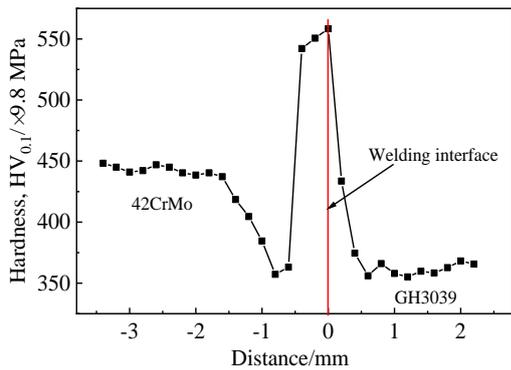


图 5 42CrMo/GH3039 焊缝截面硬度分布

Fig.5 Hardness distribution of 42CrMo/GH3039 weld seam section

42CrMo 母材的硬度在 4312~4410 MPa，而 GH3039 母材的硬度在 3430~3724 MPa，焊接界面处的硬度达到 5292~5488 MPa，焊接界面处的硬度显著高于母材。42CrMo 侧靠近焊接界面区域的硬度低于母材，有明显的软化区，宽度约为 2 mm。

42CrMo 与 GH3039 摩擦焊接界面组织及成分变化如图 6 所示。可以看出，摩擦焊接界面焊合良好，界面结合紧密，未观测到裂纹、气孔等焊接缺陷。同时，焊接界面异种金属互相嵌入、渗合、交错，有明显的分层现象。究其原因，是由于被焊的 42CrMo 与 GH3039 2 种材料化学成分、物理性能、力学性能等存在较大差异，在摩擦焊接过程中，焊接界面在摩擦压力和摩擦扭矩的双重作用下，产生了较大的塑性变形，并引起异种材料的机械混合。

以上结果表明，采用 GH3039 作为中间材料焊接 TiAl 涡轮和 42CrMo 转轴时，关键环节仍然是 TiAl 涡轮与中间材料的焊接性。经过多轮焊接试验，获得了良好的涡轮焊接工艺参数，TiAl 涡轮-GH3039-42CrMo 转轴三体摩擦焊接焊后宏观形貌如图 7 所示，结构尺寸完全符合设计要求，使得 TiAl 合金在涡轮增压器领域的实际应用成为可能。

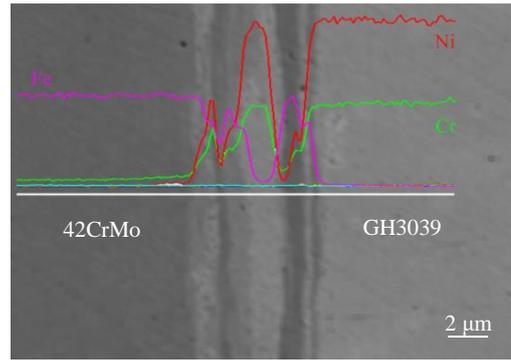


图 6 42CrMo 和 GH3039 摩擦焊接界面 SEM 组织及 EDS 元素线扫描

Fig.6 SEM microstructure and EDS element line scanning of 42CrMo and GH3039 friction welding interface



图 7 TiAl 涡轮-GH3039-42CrMo 转轴成品

Fig.7 Finished product of TiAl turbine-GH3039-42CrMo shaft

3 结 论

- 1) TiAl 合金与镍基高温合金摩擦焊接时，热力影响区化学成分及微观组织变化复杂。
- 2) TiAl 合金与镍基高温合金摩擦焊接过程中，形成了不同宽度的焊合区，焊接界面组织复杂，并生成了含多种金属间化合物的层状组织结构。
- 3) TiAl 合金与 K418、N6 的摩擦焊接性较差，与 GH3039、N80A 的摩擦焊接性较好，且焊件接头的最高抗拉强度均可达到 400 MPa 以上。
- 4) 采用 GH3039 作为中间材料，TiAl 涡轮-42CrMo 转轴摩擦焊接成品结构符合设计要求。

参考文献 References

[1] Shi Z X, Dong J X, Zhang M C *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(9): 2737

[2] Ding Yuhan(丁煜瀚). *Research on Dissimilar Inertia Friction Welding of K418 Ni-based Super Alloy Turbine Disk and 42CrMo*

- Shaft(K418 镍基合金涡轮盘与 42CrMo 轴惯性摩擦焊研究)[D].
Chongqing: Chongqing University, 2019
- [3] Shi Zhaoxia(石照夏), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓). *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2012, 41(11): 1935
- [4] Du Suigeng(杜随更), Fu Li(傅莉), Wang Jinwei(王晋伟) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(2): 323
- [5] Song Y L, Dou Z H, Zhang T A *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 789: 266
- [6] He Peng(何鹏), Feng Jicai(冯吉才), Qian Yiyu(钱乙余). *Materials Science & Technology*(材料科学与工艺)[J], 2003(2): 144
- [7] Chen G Q, Zhang G, Yin Q X *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2020, 283: 116 727
- [8] Burkhardt I, Ventzke V, Riekehr S *et al.* *Intermetallics* [J], 2019, 104: 74
- [9] Chaturvedi M C, Xu Q, Richards N L. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2001, 118(1-3): 74
- [10] Rajak D K, Pagar D D, Menezes P L *et al.* *Journal of Adhesion Science and Technology*[J], 2020, 34(24): 2613
- [11] Miyashita T, Hino H. *Journal of the Japan Institute of Metals*[J], 1994, 58(2): 215
- [12] Xu X J, Lin J P, Guo J *et al.* *Materials*[J], 2019, 12(21): 3556
- [13] Xu X J, Lin J P, Guo J *et al.* *Intermetallics*[J], 2019, 112: 106 540
- [14] Ventzke V, Riekehr S, Horstmann M *et al.* *Practical Metallography*[J], 2014, 51(5): 401
- [15] Lee W B, Kim Y J, Jung S B. *Intermetallics*[J], 2004, 12(6): 671
- [16] Park J M, Kim K Y, Kim K K *et al.* *Metals and Materials International*[J], 2018, 24: 626
- [17] Park S H, Kim K Y, Park J M *et al.* *Korean Journal of Materials Research*[J], 2019, 29(4): 258
- [18] Kumar R, Balasubramanian M. *Defence Technology*[J], 2015, 11(1): 65
- [19] Dong H G, Yu L Z, Deng D W *et al.* *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2015, 30(9): 1104
- [20] Dong H G, Yu L Z, Gao H M *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(10): 3126

Influence of Intermediate Layer on the Properties of Friction Welded Joints Between TiAl Alloy and 42CrMo Steel

Li Na^{1,2}, Du Suigeng¹, Wang Jinwei³

(1. Northwestern Polytechnical University Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Pingliang Vocational and Technical College, Pingliang 744000, China)

(3. China North Engine Research Institute, Datong 037036, China)

Abstract: The direct friction weldability of TiAl alloy and 42CrMo is poor, so the friction welding process of TiAl-42CrMo dissimilar materials was studied by introducing superalloy GH3039, K418, N80A and N6 as intermediate materials. The hardness, microstructure, composition and mechanical properties of welded joint were analyzed by hardness, scanning electron microscope and universal tester. The results show that complex intermetallic compounds layers are formed at the welding interface of TiAl alloy and dissimilar materials. Additionally, the friction weldabilities of TiAl with GH3039 and N80A are better than that with K418 and N6. GH3039 is selected as the intermediate material to improve the friction weldability of TiAl alloy and 42CrMo dissimilar material, based on factors of the linear expansion coefficient variations with temperature, the tensile strength of the welded joints, and the friction weldability with structural steel 42CrMo. By introducing the intermediate material, the integral rotor of TiAl turbine-42CrMo shaft are obtained, which represents a practical application of TiAl alloy in the field of the turbocharger.

Key words: TiAl alloy; 42CrMo; friction welding; dissimilar material

Corresponding author: Du Suigeng, Ph. D., Professor, Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88495264, E-mail: fwcenter@nwpu.edu.cn