

TiAl合金与45Cr9Si3马氏体钢异种材料电阻焊接头界面结构研究

潜坤¹, 屈莎莎¹, 张佳旋¹, 李玲玉², 周裕汉³, 韩庆文³, 谢吉林³

1. 广东省特种设备检测研究院 广东佛山 528200

2. 湖北特种设备检验检测研究院襄阳分院 湖北襄阳 441000

3. 南昌航空大学高端装备极端制造技术江西省重点实验室 江西南昌 330063

摘要: TiAl合金和45Cr9Si3马氏体钢在发动机气门阀结构中具有潜在应用价值,但二者物理、化学性能差异较大,焊接存在较大的挑战。研究发现,采用电阻焊能够实现TiAl合金和45Cr9Si3马氏体钢的良好焊接,焊接接头中不存在明显的裂纹、气孔等缺陷。在TiAl合金与45Cr9Si3马氏体钢的焊接界面存在厚度为5 μ m左右的扩散反应层,该扩散反应层主要是45Cr9Si3马氏体钢中的Fe元素向TiAl合金一侧扩散形成的。在焊缝处存在局部液化区,主要是焊接初期焊接界面的不均匀接触导致接触尖点位置瞬间通过大电流而发生液化所引起的。

关键词: TiAl合金; 45Cr9Si3马氏体钢; 异种金属焊接; 电阻焊接; 接头界面

Investigation on heterogenous interface structure in dissimilar metal resistance weld between TiAl alloy and 45Cr9Si3 martensitic steel

QIAN Kun¹, QU Shasha¹, ZHANG Jiaxuan¹, LI lingyu², ZHOU Yuhan³, HAN Qingwen³, XIE Jilin³

1. Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research, Foshan 528200, Guangdong, China

2. Hubei Special Equipment Inspection and Testing Research Institute Xiangyang Branch, Xiangyang 441000, Hubei, China

3. Key Laboratory of Extreme Manufacturing Technology for High-end Equipment, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China

Abstract: The TiAl alloy and 45Cr9Si3 martensitic steel have potential application value in engine valve structures. However, their physical and chemical properties differ significantly, posing substantial obstacles in the welding process. This study demonstrates that resistance welding is a highly efficient method for joining TiAl alloy with 45Cr9Si3 martensitic steel, resulting in a welded junction that is free from any visible fractures, porosity, or other imperfections. A diffusion reaction layer, approximately 5 μ m thick, is present at the welding interface between TiAl alloy and 45Cr9Si3 martensitic steel. The Fe elements from the 45Cr9Si3 martensitic steel largely diffuse and create a modified diffusion reaction layer on the TiAl alloy side. The weld exhibits a local liquefaction zone, which is formed due to the unequal contact of the welding interface during the initial stages of welding. This uneven contact, along with a high current, causes the contact tip to instantaneously liquefy.

Keywords: TiAl alloy; 45Cr9Si3 martensitic steel; dissimilar metal welding; resistance welding; joint interface

基金项目: 广东省市场监督管理局科技项目(2023ZT02)。

1 序言

TiAl合金具有耐热性能好、比强度高、密度较低、抗高温蠕变性能较好,以及比刚度高和抗氧化性能优异等特点,被视为新型高推比航空发动机、航天推进系统静止件和转动件、先进内燃机等极具潜力的候选材料^[1, 2]。45Cr9Si3是一种马氏体钢,具有较高的强度、硬度和耐磨性,在工业领域获得了广泛应用^[3, 4]。将TiAl合金与45Cr9Si3马氏体钢连接形成复合结构,能够发挥二者的优势,扬长避短。例如,在发动机的TiAl气门阀端部焊接45Cr9Si3马氏体钢,能够在保证气门阀的轻质性能的同时,增加气门阀的耐磨性,延长其使用寿命。

但是, TiAl合金与45Cr9Si3马氏体钢的物理、化学和冶金学性能差异巨大,在二者焊接时存在较大的挑战。高强等^[5]采用真空扩散钎焊方法,在870℃的条件下,利用B-Ag₇₂Cu填充金属层,对TiAl和42CrMo钢进行了焊接,并对其微观结构和形成机理进行了初步探讨。发现在B-Ag₇₂Cu填充金属层和TiAl的界面上没有形成金属间化合物,但在B-Ag₇₂Cu填充金属层和TiAl的界面则有金属间化合物产生。何鹏等^[6-9]对TiAl合金和40Cr钢的扩散焊进行了研究,主要分析了直接焊接和添加中间层材料焊接接头的组织和性能。研究发现,如果不用中间层进行焊接, TiAl合金和40Cr钢的界面会形成TiC、Ti₃Al、FeAl₂及FeAl等脆性的金属间化合物,从而影响焊接接头的力学性能。使用V/Cu箔作为中间层材料焊接时, Cu/Cr₄₀界面和V/Cu界面处都会出现一定连续的固溶体层,而在TiAl/V的界面从TiAl到V侧依次形成Ti₃Al层、V₅Al₈层、(Ti, V)固溶化层,然而V₅Al₈层的性能较差,在该层厚度过大时会使得焊接接头性能恶化。试验中最大的抗拉强度为200MPa。之后作者还用Ti/V/Cu作为中间层来进行扩散焊接, Ti中间层的加入,使得TiAl/Ti界面生成了有利的TiAl及Ti₃Al双相层和Ti固溶体层,焊接接头出现了较好的性能,最大抗拉强度为420MPa。DONG等^[10]研究了TiAl/40Cr钢的摩擦焊接头的组织及力学性能。焊接接头的焊缝出现了裂纹,强度只有86MPa,认为在断口周围出现的脆性TiC和马氏体组织,使焊接接头性能发生恶化。但是只要对其进行580℃和630℃热处理后,回火索氏体组织的形成使得接头性能有了显著的改善,可使其

具有390MPa和330MPa抗拉强度。从以上研究可发现, TiAl合金与钢的焊接主要依靠采用钎焊、扩散焊或固相焊接技术。但是, 钎焊接头的强度低、焊接效率低, 不适宜焊接承载能力较大的构件; 扩散焊的效率低、焊接工序复杂; 摩擦焊等固相焊接技术对焊接设备的要求较高、焊接成本高。电阻焊是一种高效率、低成本焊接技术, 在工业领域被广泛采用^[11, 12]。

基于此, 本文采用电阻焊接技术对TiAl合金与45Cr9Si3马氏体钢进行焊接, 对焊接接头的微观组织、界面结构开展研究, 为发动机异种金属气门阀结构的制造奠定理论基础。

2 研究材料与方法

焊接设备为镇江清华焊接设备有限公司生产的PIH-200型电阻焊机, 母材采用铸态45Cr9Si3马氏体钢(以下简称45Cr9Si3钢)和变形态TiAl合金, 化学成分见表1。焊接试样的直径分别为7.3mm、7.8mm, 高度分别为2mm、10mm, 焊前使用水磨砂纸研磨试样的待焊接面, 然后在丙酮浴中超声波清洗20min, 去除氧化层、油污后风干备用。

将45Cr9Si3钢放在TiAl合金上面以搭接形式进行电阻焊接, 焊接参数分别为焊接时间8s、焊接电流6.1kA、预热电流2.5kA、预热时间3s、焊接压力0.22MPa。焊后采用电火花线切割机垂直于焊接试样中心切取金相试样。金相试样经过砂纸打磨、抛光后用于接头显微组织分析。

3 研究结果与分析

3.1 接头宏观形貌

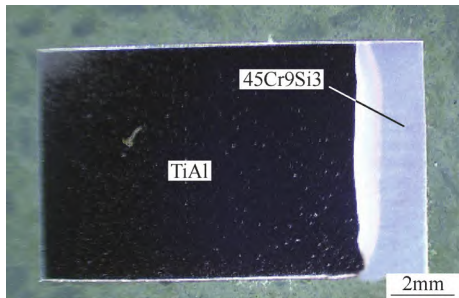
图1a所示为TiAl合金和45Cr9Si3钢异种金属焊接接头的宏观形貌, 左侧为TiAl合金, 右侧为45Cr9Si3钢。从图1a可看出, 焊接接头在靠近45Cr9Si3钢侧的热影响区宽度不均匀, 最宽处约为0.82mm、最窄处为0.26mm。图1b~c所示为TiAl合金和45Cr9Si3钢电阻焊接头在不同放大倍数下的显微组织。从图1b~c可看出, TiAl合金和45Cr9Si3钢

表1 TiAl合金和45Cr9Si3钢的主要化学成分

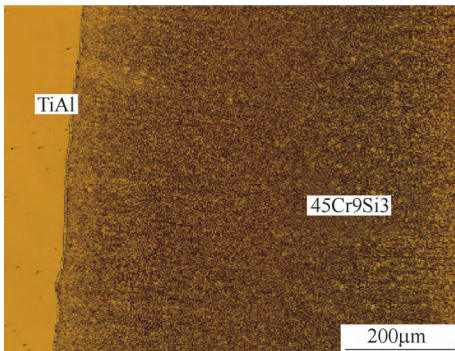
(质量分数) (%)

材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Nb	Mo	Al	Fe
45Cr9Si3钢	1.99	5.49	0.29	8.63	0.09	0.01	0.01	—	—	余量
TiAl合金	—	—	5.0	—	—	余量	—	1.0	42.0	—

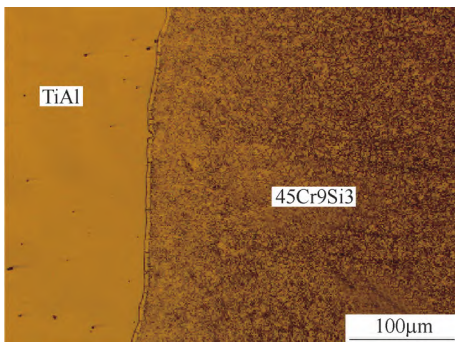
两者形成了有效连接,界面没有明显的裂纹、未焊合及气孔等缺陷。



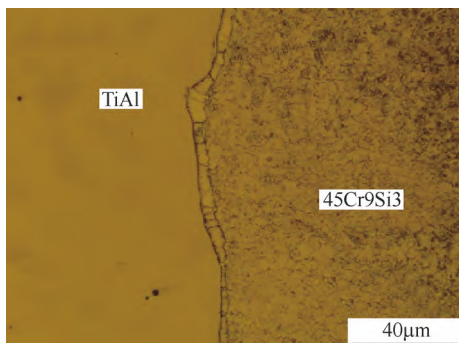
a) 宏观形貌



b) 金相组织 (100×)



c) 金相组织 (200×)



d) 金相组织 (500×)

图1 焊接接头宏观形貌与金相组织

3.2 接头的微观组织

(1) 接头界面结构 为进一步分析焊接接头的微观组织,采用SEM对焊接接头界面进行了分析,

结果如图2所示。TiAl合金母材呈现典型的网状组织,而45Cr9Si3钢侧则是等轴状的马氏体组织。在TiAl合金与45Cr9Si3钢之间形成的并不是典型电阻焊接头的熔化焊焊核结构,而是形成了厚度约为5μm的扩散层,扩散层与两侧母材之间存在明显的界面,并分成两个不同区域。为了分析界面反应层的组成,采用EDS对两个不同的反应区域进行了化学成分分析,结果见表2。

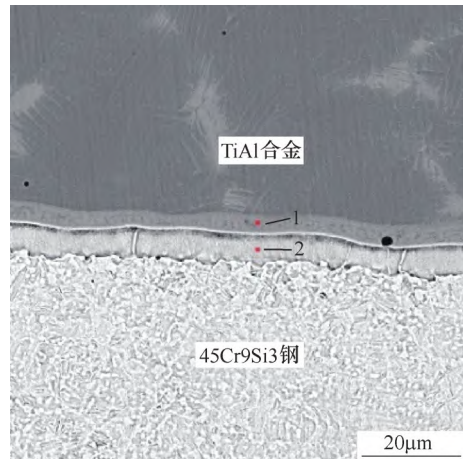


图2 TiAl合金和45Cr9Si3钢焊接接头SEM组织

表2 点1和点2的化学成分 (质量分数) (%)

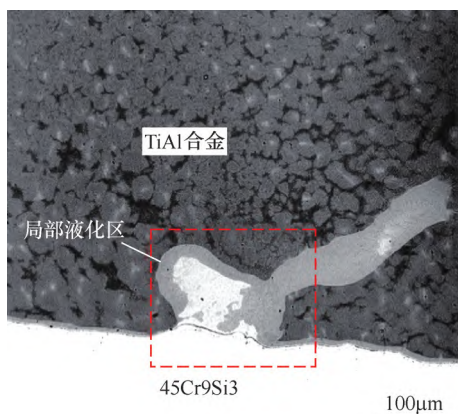
位置	Ti	Al	Fe	C	Mn	Si	Cr	W	Mo
点1	42.99	34.45	11.50	5.26	1.98	1.40	0.98	0.86	0.58
点2	—	—	75.20	10.80	—	6.60	7.39	—	—

从表2的结果可看出,在TiAl合金一侧的反应层1(点1所在区域)主要由Ti、Al和Fe及部分45Cr9Si3钢中的C元素等构成;其中,Ti、Al和Fe含量分别为42.99%、34.45%和11.50%,其余元素含量较少;由此推测,在此处可能由Ti-Al、Ti-Fe和Al-Fe金属间化合物组成。45Cr9Si3钢一侧的反应层2(点2所在区域)主要由45Cr9Si3钢成分组成,Fe元素的含量为75.20%,C含量为10.80%,其余元素含量<10%。

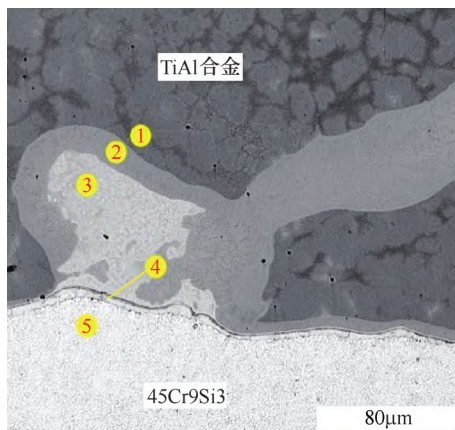
分析两个反应层中的元素含量可发现,TiAl合金和45Cr9Si3钢在电阻焊接过程中发生扩散而连接,但以45Cr9Si3钢向TiAl合金扩散为主。这是由于反应层2的成分不含TiAl合金的元素,而主要是45Cr9Si3马氏体钢的元素,在反应层1位置含有两种材料的元素;根据扩散理论,一般情况下熔点高、原子半径小的元素易于向熔点低、原子半径大的元素扩散^[13]。Ti元素和Fe元素的熔点接近(1660℃、

1538℃)，半径分别为0.147nm和0.127nm，Al元素的熔点和原子半径分别为660℃和0.143nm，其熔点比Fe元素低，原子半径比Fe元素大，因此Fe元素更容易向Ti和Al元素扩散。因此，在本次焊接时45Cr9Si3马氏体钢中的Fe元素比TiAl合金中的Ti元素和Al元素扩散得快，导致反应层2中几乎没有发现Ti元素和Al元素。由于扩散是一个相互的过程，因此TiAl合金中少量的Ti元素和Al元素依然会向45Cr9Si3钢侧扩散，进而形成反应层1。

(2) 局部液化区分析 在TiAl合金和45Cr9Si3钢界面还可以看到一个局部凸出的反应层，形貌如图3所示。从图3可清楚地看到，突出反应层从45Cr9Si3钢向TiAl合金侧延伸，延伸距离约为70μm。此外，还发现该区域附近有许多岛状组织，并在TiAl合金侧有局部液化的痕迹。分析认为，在电阻焊的大热输入量中，先接触的焊接接头位置发生了大电流导致的局部液化反应，形成局部液M化区。



a) 形貌



b) EDS打点位置

图3 焊接接头局部液相区

采用EDS对局部液化区域各个位置的元素分布进行了测量，结果见表3。图3b中的位置A和位置E分别是TiAl合金和45Cr9Si3钢母材位置，但位置A有C元素存在，而试验采用的TiAl合金不含C元素，因此可以确定该区域的C元素来自45Cr9Si3钢。宗波等^[14]研究表明，随着C含量增加，TiAl合金的力学性能会呈现先升高后降低的趋势，C含量在0.6%时性能最好。然而，该区域的C含量高达5.14%，导致该区域的脆性较大，有微裂纹产生。位置E主要是45Cr9Si3钢母材，不存在TiAl合金中的元素。

位置B处于液化区和TiAl合金之间的位置，其元素含量与图2中的点1元素含量相似。位置D处的Ti和Al的含量较少，主要是45Cr9Si3钢中的元素。与图2中点2的元素含量相似。位置C处包含了TiAl合金和45Cr9Si3马氏体钢两种材料的主要元素，且含量接近。由此可初步推测，该区域主要是TiAl合金和45Cr9Si3钢的混合反应区。

表3 局部液化区EDS成分分析（质量分数） (%)

打点位置	Ti	Al	Mn	Fe	Mo	Cr	W	Si	C
A	48.26	42.41	3.22	—	—	—	—	—	5.14
B	39.40	34.68	2.61	14.60	0.04	1.09	0.85	1.12	5.62
C	25.86	20.08	1.23	44.48	0.37	3.92	—	3.93	—
D	0.56	0.79	—	77.67	0.04	5.92	—	2.09	9.94
E	—	—	—	71.88	—	10.24	—	4.64	13.25

4 结束语

1) 采用电阻焊能够实现TiAl合金和45Cr9Si3钢的良好焊接，焊接接头不存在明显的裂纹、气孔等缺陷。

2) 在TiAl合金与45Cr9Si3钢的焊接界面存在厚度为5μm左右的扩散反应层，该扩散反应层主要是45Cr9Si3钢中的Fe元素向TiAl合金一侧扩散形成的。

3) 在焊缝处存在局部液化区，其形成主要是因焊接初期焊接界面的不均匀接触导致接触尖点位置瞬间通过大电流而发生液化所引起的。

参考文献：

- [1] 宋晓国，司晓庆，曹健，等. 高铌TiAl合金钎焊接头组织和性能研究[J]. 稀有金属材料与工程，2018，47（1）：52-58.
- [2] 刘齐. 双丝电弧增材制造钛铝合金组织性能研究[D]. 天津：天津大学，2020.

（下转第80页）

- 究[J]. 机电产品开发与创新, 2024, 3 (37) : 57-59.
- [2] 王静, 吴浩杰. 注塑模具随形冷却管道自动生成技术[J]. 工程塑料应用, 2024, 5 (52) : 121-127.
- [3] SIDDIQUI A, DUBEY A. Recent trends in laser cladding and surface alloying[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 106619 (134) : 1-20.
- [4] 罗洪峰, 史留勇, 林茂. H13钢耐铝液腐蚀表面处理的研究进展[J]. 铸造技术, 2017, 66 (3) : 250-253.
- [5] 杜学芸, 杨帆, 董仕营. H13热作模具钢的强化处理及增材制造研究[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (8) : 24-28.
- [6] LU CH Q, CHEN ZH Y, YAN Y Q, et al. Enhanced high-temperature wear performance of H13 steel through TiC incorporation by laser metal deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 16 (99) : 1-12.
- [7] KARMAKER DEBAPRIYA, MUVVALA GOPINATH, NATH ASHISH. High-temperature abrasive wear characteristics of H13 steel modified by laser remelting and clad with stellite 6 and stellite 6/30% WC[J]. Surface and Coating Technology, 2021, 422 (25) : 1-12.
- [8] NORHAFAZAN B, AQIDA S, CHIKARAKARA E, et al. Surface modification of AISI H13 tool steel by laser cladding with NiTi powder[J]. Applied Physics A, 2016, 122 (384) : 1-6.
- [9] 刘洪喜, 唐淑君, 蔡川雄, 等. 模具钢表面激光原位制备Ni基合金复合涂层的微结构与性能[J]. 中国激光, 2013, 40 (6) : 156-161.
- [10] 曹俊. H13模具钢表面激光再制造Fe基合金熔覆层组织和性能的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [11] 任建华. 40Cr 模具钢激光熔覆层组织及性能分析[J]. 模具工业, 2017, 43 (7) : 59-61.
- [12] FENG Y L, PANG X T, FENG K, et al. A method for evaluating the crack resistance and predicting the preheating temperature of high hardness coating prepared by laser cladding[J]. Surface and Coating Technology, 2022, 432 (25) : 1-12.

MW 20241107

(上接第73页)

- [3] 李青锋, 张艳. 新型奥氏体耐热钢与马氏体耐热钢焊接工艺探究[J]. 电力与能源, 2018, 39 (4) : 556-559.
- [4] 张俊华, 牛锐锋, 赵宏刚. 10Cr13Ni2马氏体钢焊接接头组织及腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30 (6) : 620-624.
- [5] 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 (S1) : 51-54.
- [6] 何鹏. TiAl与40Cr钢复合阻隔法扩散连接机理及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- [7] 何鹏, 张秉刚, 冯吉才, 等. 以TiV/Cu、V/Cu为中间层的TiAl合金与40Cr钢的扩散连接[J]. 宇航材料工艺, 2000 (4) : 53-57.
- [8] HE P, FENG J C, ZHANG B G, et al. Microstructure and strength of diffusion-bonded joints of TiAl base alloy to steel[J]. Materials Characterization, 2002, 48 (5) : 401-406.
- [9] HE P, FENG J C, ZHANG B G, et al. A new technology for diffusion bonding intermetallic TiAl to steel with composite barrier layers[J]. Materials Characterization, 2003, 50 (1) : 87-92.
- [10] DONG C, DONG H G, YU L Z, et al. Microstructure and mechanical properties of friction welds between TiAl alloy and 40Cr steel rods[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (10) : 3126-3133.
- [11] 方一, 曾凡勇, 肖志威, 等. 自动电阻焊在不锈钢垫块焊接中的应用研究[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (11) : 14-19.
- [12] 张惠, 立江红, 张正举, 等. 中频智能一体式焊钳技术在汽车生产中的应用研究[J]. 内燃机与配件, 2021 (8) : 219-220.
- [13] 王恒, 刘黎明, 柳绪静. 镁铝异种材料TIG焊接接头扩散行为分析[J]. 焊接学报, 2005 (7) : 5-8, 81.
- [14] 宗波, 董恒平, 冯冲. C元素含量对TiAl合金显微组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (16) : 104-107.

MW 20240806