

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.11.18

超声对TC4表面金刚石复合涂层组织的影响研究

郭军华¹, 秦建¹, 孙华为¹, 刘攀¹, 张雷^{1*}, 吴艳明², 王威³, 刘鸣放⁴

1. 中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司 新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001
2. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 100083
3. 亚琛联合科技(天津)有限公司, 天津 300457
4. 河南省煤炭科学研究院有限公司, 河南 郑州 450001

摘要: 为提升钛合金表面的耐磨性, 采用超声辅助气保护钎焊技术, 在TC4钛合金表面制备了金刚石复合钎涂层, 以探究超声对涂层微观组织的影响, 并揭示其细化晶粒的机理。通过在AlSi钎料中加入一定比例金刚石粉末和CuTi合金粉, 并施加超声波作用, 制备了不同工艺参数下的金刚石复合钎涂层。研究结果表明, 钎涂层中Cu、Al反应产物的先后生成顺序理论上应依次为Cu₉Al₄、CuAl₂和CuAl; Ti与Al、C三种元素反应, 可能形成的化合物分别为TiC和TiAl₃; 超声辅助可以有效促进金刚石颗粒在钎涂层中的均匀分布, 并加速钎涂层中的Ti、Al、Cu原子间的相互扩散, 在750℃保温90s, Ti(Cu, Al)₂便可在钎涂层组织内出现; 钎涂基体组织中存在大量团聚的未长大的Ti(Al_{1-x}Si_x)₃, 钎涂层组织晶粒发生明显细化, 实现了CuAl₂相在钎涂层组织中的弥散分布。

关键词: 钛合金; 金刚石; 钎涂; 超声; 微观组织

中图分类号: TG425 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)11-0133-07

Study on the Influence of Ultrasonic Enhancement on the Microstructure of Diamond Composite Coating on TC4 Surface

GUO Junhua¹, QIN Jian¹, SUN Huawei¹, LIU Pan¹, ZHANG Lei^{1*}, WU Yanming², WANG Wei³, LIU Mingfang⁴

1. State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals and Technology, China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China
2. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, China
3. ACunity (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300457, China
4. Henan Coal Scientific Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China

Abstract: To enhance the wear resistance of titanium alloy surfaces, ultrasonic-assisted gas shielded brazing technology was employed to prepare a diamond composite brazing coating on the TC4 titanium alloy surface. This was done to investigate the impact of ultrasound on the microstructure of the coating and to reveal its mechanism for refining grains. By adding a certain proportion of diamond powder and CuTi alloy powder to the AlSi brazing filler metal and applying ultrasonic waves, diamond composite brazing coatings were prepared under different process parameters. The research results show that the order of formation of Cu and Al reaction products in the brazing coating should theoretically be Cu₉Al₄, CuAl₂, and CuAl; Ti reacts with Al and C, and the possible compounds formed are TiC and TiAl₃. Ultrasonic assistance can effectively promote the uniform distribution of diamond particles in the brazing coating and accelerate the mutual diffusion of Ti, Al, and Cu atoms in the brazing coating. At 750°C with a holding time of 90 seconds, Ti(Cu, Al)₂ can appear within the brazing coating structure. There are many aggregated ungrown Ti(Al_{1-x}Si_x)₃ in the brazing substrate structure, and the grain size of the brazing coating structure is significantly refined, achieving a dispersed distribution of the CuAl₂ phase in the brazing coating structure.

Keywords: titanium alloy; diamond; brazing coating; ultrasound; microstructure

收稿日期: 2024-09-12

基金项目: 中原科技创新领军人才(234200510015); 河南省重点研发专项(241111233300)

作者简介: 郭军华(1992—), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事有色金属加工、钎焊技术研究。

通讯作者: 张雷, 正高级工程师, 硕士生导师, 主要从事先进连接技术与装备等研发及成果转化工作。E-mail: zhanglei86529029@sina.com.cn。



引用格式:郭军华,秦建,孙华为,等. 超声对TC4表面金刚石复合涂层组织的影响研究[J]. 电焊机, 2024, 54(11): 133-139.

Citation:GUO Junhua, QIN Jian, SUN Huawei, et al. Study on the Influence of Ultrasonic Enhancement on the Microstructure of Diamond Composite Coating on TC4 Surface[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(11): 133-139.

0 引言

TC4合金(Ti-6Al-4V)是一种 α - β 型两相钛合金,具有出色的机械性能,如密度低、比强度高、耐腐蚀性能优越、良好的高温稳定性和抗疲劳性能^[1]。但是其硬度较低,通常为33~35 HRC,常规的热处理手段难以显著提升其表面硬度^[2]。钛合金较低的表面硬度和耐磨性能限制了其应用范围,例如在涡轮发动机中,TC4合金的压气机叶片/圆盘界面极易发生微动磨损,产生的氧化物碎片导致燕尾结合部位划伤,最终引发部件失效^[3]。因此,为了改善钛合金的表面耐磨性,需要对钛合金表面进行耐磨改性处理^[4-5]。

钎涂作为一种特殊的钎焊方法,是将低熔点的钎焊材料和高熔点的硬质颗粒与基体同时加热,实现钎料对硬质颗粒和基体的润湿,并在基体表面形成耐磨钎涂层^[6]。钎涂能够实现非金属硬质颗粒/金属与基体的冶金结合,具有热输入低、钎涂层与基体结合强度高、涂层厚度可控等诸多优势,在提升部件表面耐磨性方面具有重要的技术应用前景^[7-9]。龙伟民等^[10]通过在旋耕刀表面钎焊金刚石涂层后实现了旋耕刀耐磨性能的成倍提升。此外,适当的涂层厚度对于保证刀具的自锐性至关重要^[11]。许祥平等^[12]发明了一种WC-10Ni/BNi-2复合涂层钻头制备方法,提高了钻头的硬度、耐磨性和耐冲击性。

金刚石因其高耐磨性、高硬度、高弹性和低摩擦系数等特点,在金刚石砂轮、刀具、石油与煤炭行业钻采钻头等领域得到了广泛应用^[13]。钎涂金刚石常用的方法是真空钎涂和气保护钎焊^[14-16]。由于金刚石是强共价键结合,电子配位非常稳定,钎焊金刚石的钎料中通常会添加Ti、Cr等过渡元素,以促进金刚石的化学冶金反应^[10,17]。常见的用于钎焊金刚石的钎料包括:银基钎料(AgCuTi、AgCuInTi、AgTi等),铜基钎料(以CuSnTi为主),镍基钎料(NiCrP、NiCrSiB等)^[18-22],这些钎料基本都为活性钎料,成本相对较高。

针对上述问题,本文通过在AlSi钎料中加入一定比例的金刚石粉末与CuTi合金粉,采用超声辅助气保护钎焊方法成功地在TC4表面制备了金刚石复合钎涂层,并研究了超声对复合涂层微观组织的影响,揭示了超声细化钎涂层晶粒的机理,为钛合金的钎涂方法提供了一定的理论基础。

1 试验方法

试验使用的人造金刚石粒径为250~280 μm 。钎涂基体为TC4钛合金,其成分见表1。所采用的钎料合金为Al-12Si钎料+CuTi合金,其中Al-12Si熔化温度为577 $^{\circ}\text{C}$,其在熔化后形成的液相铝与母材钛界面的相互反应实现钎料对TC4的润湿。CuTi合金粉(74 μm)中元素Cu与Ti的质量分数各为50%。

在Al-12Si钎料中添加20 wt.%的金刚石颗粒和10 wt.% CuTi合金粉。采用球磨的方式制备复合钎涂材料,在研磨罐里放入直径6~10 mm的氧化铝陶瓷球磨90 min,球/料重量比为8:1。试样尺寸为20 mm \times 15 mm \times 4 mm,在混合合金粉中加入少量丙二醇制成膏状物,均匀预置在TC4钛合金试样表面,厚度为2 mm;随后在真空烘箱烘干,烘干条件为180 $^{\circ}\text{C}$,保温2 h。

超声波辅助钎焊系统包括超声波电源、超声波换能器、感应加热电源(型号SP35,额定功率35 kW,频率4.5 kHz,工作电流380 A)、红外测温装置、石英气保护罩以及工作平台等,如图1所示。其中,钛合金块中心开有沉头螺孔,通过 \varnothing 10 mm螺丝与超声波换能器机械连接。超声波换能器的振动频率为20 \pm 0.05 kHz,输出振幅为3~10 μm ,超声波的电源输出功率为0.2~1 kW。加热温度通过PID温控器控制,钎焊温度分别为650 \pm 10 $^{\circ}\text{C}$ 、730 \pm 10 $^{\circ}\text{C}$;超声波每个输出周期可以持续输出时间为12 s;达到钎焊温度以后,施加超声作用保持一定时间。当钎焊过程中超声作用结束时,停止感应加热。超声辅助钎涂的试验方案如表2所示。



表 1 Ti-6Al-4V 钛合金的化学成分(质量分数, %)

Ti	Al	V	Zr	Cu	Ni
余量	6.0	4.0	—	—	—

表 2 超声辅助钎涂试验方案

试验方案	加热温度/°C	超声作用时长/s
1	730	12
2	650, 730, 830	36
3	730	60
4	750	90

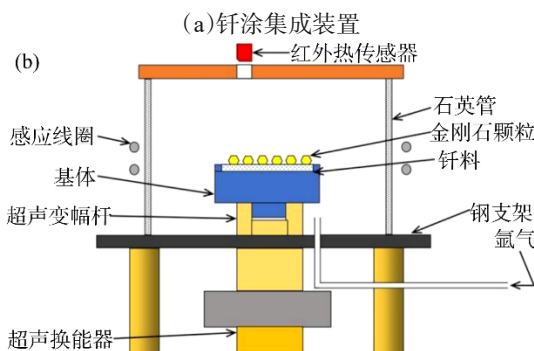


图 1 超声辅助钎涂系统

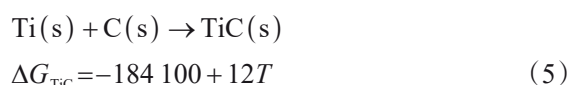
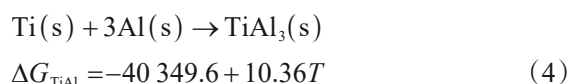
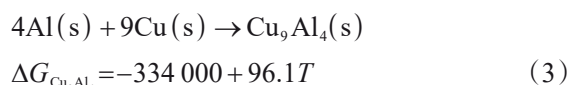
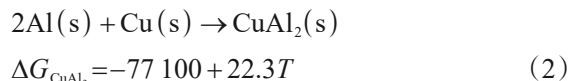
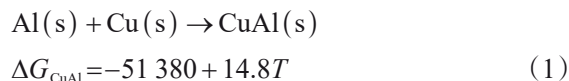
Fig. 1 Ultrasonic assisted brazing system

2 试验结果分析与讨论

2.1 涂层中增强相热力学研究

判定一个反应体系能否自发进行时,通常将吉布斯自由能 ΔG 作为热力学判据。钎涂层中各种金属间化合物生成与吉布斯自由能 ΔG 密切相关,理论上讲,在相同的加热条件下, ΔG 值为负且数值越小,表明该反应自发且优先进行。AlSi 钎料与 CuTi 合金发生原位反应过程中,含有金刚石钎涂层内部

可能发生的化学反应如式(1)~式(5)。通过计算可以得到金属间化合物的生成吉布斯自由能 ΔG (J/mol)与反应温度 T (K)的关系^[23-24]:



根据上述关系式画出的吉布斯自由能与反应温度的关系如图 2 所示。本文中钎涂试验所选取的加热温度为 900~1 100 K,上述反应均可自发进行,其中,Cu、Al 反应产物的先后生成顺序理论上应依次为 Cu_9Al_4 、 CuAl_2 和 CuAl 。Ti 与 Al、C 三种元素反应,可能形成的化合物分别为 TiC 和 TiAl_3 。值得关注的涂层中原位生成的铜铝金属间化合物,尽管绝大多数铜铝金属间化合物(如 CuAl_2)为脆性相,并容易在晶界处富集,导致材料的脆性增加,抗冲击性能下降;但是这类金属间化合物绝大多数硬度较高,如果工艺方法对其生成量与分布调控得当(例如在 2 系铝合金中 CuAl_2 有着显著的时效强化效果),是有可能成为提高钎涂层合金硬度的技术路径。Wang 等人^[25]在 Mg-Li 合金表面激光熔覆 Cu-Al 合金,制备的涂层与镁合金相容性好,涂层硬度提高了 6.75 倍,磨损量降低了 88.32%。实际上,钎涂过程伴随着元素间复杂的化学反应,该过程中的反应程度受到钎焊温度、反应时间等因素的影响,该部分的热力学分析仅仅是在简单体系下揭示了 Cu、Al 间发生反应的本质,对于本论文开展的相关试验研究提供了方向性的指引。

CuTi 含量对钎涂层组液态 AlSi 钎料与 CuTi 合金颗粒的反应程度对钎涂层基体的显微组织和耐磨性能具有重要影响。在经典热力学理论中,增加反应物的含量或者降低生成物的含量,均可以促进反应正向进行。以元素 Ti 的含量对反应进程的促



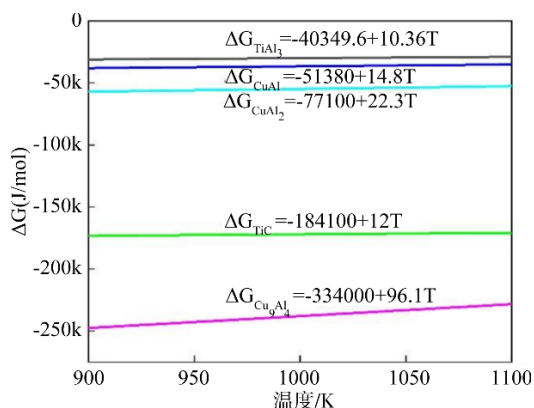


图2 涂层中物相形成吉布斯自由能与反应温度的关系

Fig. 2 Relationship between Gibbs free energy and reaction temperature for phase formation in coatings

进效果为例,杨卫岐^[26]通过比较不同Ti元素含量的Ag-Cu-Ti(Ti含量1.8 wt.%)钎料和Ti-Cu(Ti含量43 wt.%)钎料,发现Ti-Cu体系的原位反应进度竟然是Ag-Cu-Ti体系中的588倍,进一步佐证了高含量的元素Ti有利于推进反应的正向进行。因此,通过在AlSi钎料中增加CuTi合金含量,从热力学角度来讲有利于上述原位反应产物的生成。

2.2 超声辅助作用下钎涂层微观组织研究

在异种材料连接技术领域,多数研究者利用超声波的空化效应和其在液相传播中的声流作用,达

到改进接头连接质量、促进反应进度的效果。本文在750 °C钎涂温度条件下,对含10 wt.%的50/60目CuTi颗粒的钎涂层施加超声波,作用时间90 s,随后自然冷却至室温,金刚石颗粒在超声制备的金刚石复合钎涂层中分布如图3所示。在超声作用下,CuTi合金颗粒加速在液态AlSi钎料中溶解,增加了AlSi钎料的粘度,降低了金刚石颗粒被凝固界面推移的速度,避免了金刚石颗粒的大范围迁移;另一方面,由于超声在液态AlSi钎料中产生的声流效应,导致金刚石颗粒无法偏聚;金刚石在声流效应作用下分散至钎涂层各处,保留了原有的均匀分布的特性。

超声辅助制备的钎涂层组织如图4所示。对比

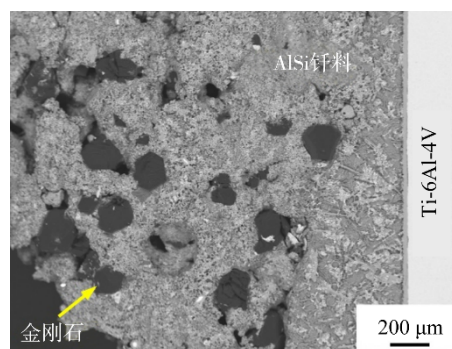


图3 超声对金刚石颗粒在钎涂层中的分布

Fig. 3 Distribution of diamond particles in brazing coating by ultrasound

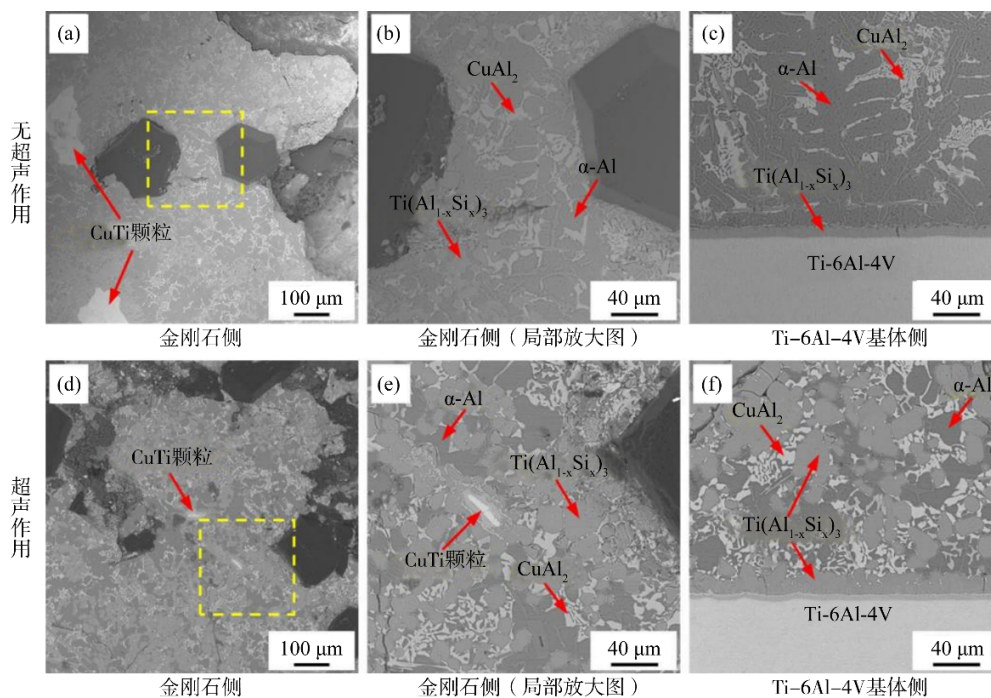


图4 超声作用后钎涂层的显微组织

Fig. 4 Microstructure of the brazing coating after ultrasonic treatment

图 4a、4d, 可以发现未施加超声波时, 等温反应 90 s 后在钎涂层组织中仍然存在较大的 CuTi 颗粒; 而在等温反应的 90 s 内持续施加超声波后, CuTi 合金由较大颗粒变为纤细条状形态, 表明在相同温度下 CuTi 颗粒在钎涂层 AlSi 合金中的溶解速度明显加快。显然, 无超声作用下 CuTi 颗粒与周围液态 AlSi 合金的扩散速率明显低于超声作用条件, 这是由于超声在液态 AlSi 钎料中产生的空化气泡, 作用在 CuTi 合金颗粒上, 当空化气泡爆破时产生的液相射流速度高达每秒上百米, 并在 CuTi 颗粒表面形成微米尺度的瞬时“热点”, 促进了 CuTi 化合物向周边液态 AlSi 钎料的溶解与扩散。

为进一步确定超声作用下 CuTi 合金与液态 AlSi 合金的反应产物, 采用 XRD 法对钎涂层组织进行物相分析, 如图 5 所示, 钎涂层中主要存在 CuAl₂、Ti(Al_{1-x}Si_x)₃、Cu₂Ti、α-Al 和 Ti(Cu, Al)₂。与 750 °C、保温 90 s 的非超声试验条件下获取钎涂层中的物相比较, 新生成了 Ti(Cu, Al)₂ 化合物; 表明超声能够加速钎涂层中的 Ti、Al、Cu 原子间的相互扩散, 在相对较低的加热温度(750 °C)和相对较短的保温时间(90 s)内, Ti(Cu, Al)₂ 便可在钎涂层组织内出现。

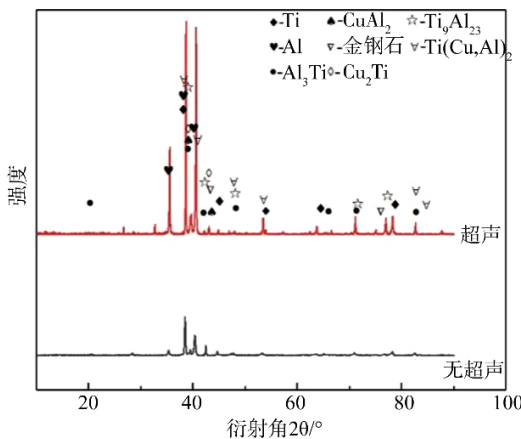


图 5 超声作用下的涂层物相 XRD 衍射图谱

Fig. 5 XRD diffraction patterns of coating phase with ultrasound action

2.3 超声细化涂层晶粒细化机制

对比图 4c、4f, 可以看到未施加超声的钎涂组织存在粗大的 α-Al 树枝晶, 而超声作用下的钎涂基体组织中存在大量团聚的未长大 Ti(Al_{1-x}Si_x)₃, 钎涂层组织晶粒发生明显细化。根据前人的研究结果, 超声细化晶粒的机理主要包括空化促进形核(绝热膨胀、脉冲熔点机制)、超声促进枝晶破碎等^[27-28]。晶

粒细化机制可以从超声空化角度解释: 由于钎涂层中的胞状晶粒的成分主要由 Ti、Al、Si 三种元素组成, 因此可以排除 CuTi 颗粒在超声作用下破碎提供形核质点。超声波在液态 AlSi 钎料中生成空化气泡并迅速膨胀, 导致气泡周边小区域内温度降低并形成过冷度, 为晶核析出提供了条件。另一方面, 如图 6 所示, 超声空化效应冲击钎涂层与钛合金基体界面, 导致界面生长的 Ti(Al_{1-x}Si_x)₃ 从 Ti-6Al-4V

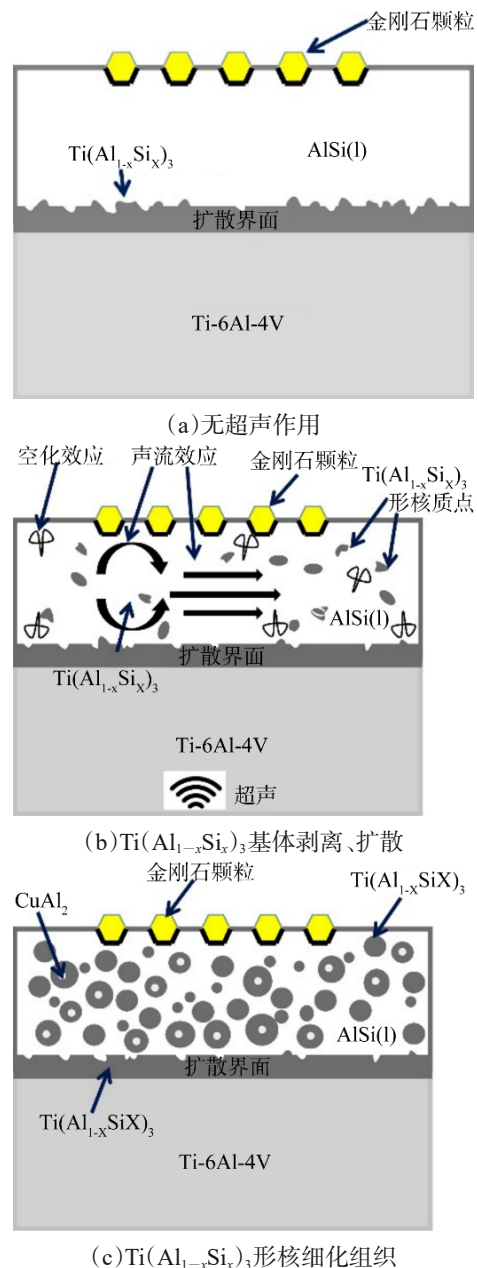


图 6 750 °C 超声细化钎涂层晶粒机理示意

Fig. 6 Schematic diagram of grain refinement mechanism of 750 °C ultrasonic brazing coating

重点专题 | 堆焊及表面工程

基体剥离,并在声流作用下充分分布在液态 AlSi 钎料中;在冷却阶段,这些剥离出来的金属间化合物颗粒作为形核质点,导致所获取的钎涂合金组织以细化尺寸的晶粒为主。由于 CuAl_2 作为析出相,主要在 $\alpha\text{-Al}$ 和 $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$ 界面处生长;在超声作用下, $\alpha\text{-Al}$ 和 $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$ 的组织晶粒细化,也实现了 CuAl_2 相在钎涂层组织中的弥散分布,可能发挥“沉淀硬化”效应,提高涂层合金基体的硬度与强度。

3 结论

本文深入探讨了超声对 TC4 表面金刚石复合涂层组织的影响规律,主要结论如下:

(1)通过热力学计算可知,钎涂层中 Cu、Al 反应产物的先后生成顺序理论上应依次为 Cu_9Al_4 、 CuAl_2 和 CuAl ;Ti 与 Al、C 三种元素反应,可能形成的化合物分别为 TiC 和 TiAl_3 。

(2)超声辅助有效促进了 CuTi 合金在液态 AlSi 钎料中的溶解,避免了金刚石颗粒的迁移和偏聚,实现了金刚石在涂层中的均匀分布。并加速钎涂层中的 Ti、Al、Cu 原子间的相互扩散,在相对较低的加热温度和相对较短的保温时间内, $\text{Ti}(\text{Cu},\text{Al})_2$ 便可在钎涂层组织内出现。

(3)超声作用下的钎涂基体组织中存在大量团聚的未长大 $\text{Ti}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)_3$,钎涂层组织晶粒发生明显细化,实现了 CuAl_2 相的弥散分布,发挥“沉淀硬化”效应,提高涂层合金基体的硬度与强度。

参考文献:

- [1] Xie R Z, Lin N M, Zhou P, et al. Surface damage mitigation of TC4 alloy via micro arc oxidation for oil and gas exploitation application: Characterizations of microstructure and evaluations on surface performance [J]. Applied Surface Science, 2018, 436: 467-476.
- [2] Bruni S, Martinesi M, Stio M, et al. Effects of surface treatment of Ti-6Al-4V titanium alloy on biocompatibility in cultured human umbilical vein endothelial cells [J]. Acta biomaterialia, 2005, 1(2): 223-234.
- [3] Hager Jr C H, Sanders J H, Sharma S. Effect of high temperature on the characterization of fretting wear regimes at Ti6Al4V interfaces [J]. Wear, 2006, 260 (4-5): 493-508.

- [4] Breuninger P, Krull F, Buhl S, et al. Microstructuring of titanium surfaces with plasma-modified titanium particles by cold spraying [J]. Particuology, 2019, 44: 90-104.
- [5] Gao C, Dai L, Meng W, et al. Electrochemically promoted electroless nickel-phosphorous plating on titanium substrate [J]. Applied Surface Science, 2017, 392: 912-919.
- [6] 司浩,秦建,钟素娟,等.钎涂技术的研究进展 [J].材料导报,2021,35(Z2):333-345.
SI H, QIN J, ZHONG S J, et al. Research progress of brazing technology [J]. Materials Reports, 2021, 35 (Z2): 333-345.
- [7] Long W M, Liu D S, Dong X, et al. Laser power effects on properties of laser brazing diamond coating [J]. Surface Engineering, 2020, 36(12): 1315-1326.
- [8] 司浩,秦建,钟素娟,等.感应加热金刚石/镍基复合涂层微观组织与性能 [J].稀有金属材料与工程,2023,52(3):1027-1035.
SI H, QIN J, ZHONG S J, et al. Microstructure and properties of induction heating diamond/nickel based composite coating [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(3): 1027-1035.
- [9] Liu D S, Long W M, Wu M F, et al. Microstructure Evolution and Lifetime Extension Mechanism of Sn-Added Fe-Based Pre-Alloy Brazing Coating in Diamond Tools [J]. Coatings, 2019, 9(6): 364.
- [10] 龙伟民,秦建,路全彬,等.旋耕刀感应钎涂层热处理工艺研究 [J].材料导报,2022,36(7):92-96.
LONG W M, QIN J, LU Q B, et al. Research on Heat Treatment Process of Induction Brazing Coating for Rotary Tillage Knife [J]. Materials Reports, 2022, 36(7): 92-96.
- [11] Ma B J, Yang G L, Bu F N. Study of brazed diamond micro-powder burs fabricated using induction brazing with either an amorphous or a crystalline Ni-based filler alloy [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2016, 62: 58-63.
- [12] 许祥平,王怡,邹家生,等. BNi-2 复合涂层、采用该复合涂层制备的钻头及其制备方法: 201811502466.6 [P]. 2019-05-28.
- [13] 龙伟民,刘大双,王博,等.铝微粉对大气环境感应钎涂金刚石涂层性能影响 [J].焊接学报,2021,42(12):67-71.
LONG W M, LIU D S, WANG B, et al. The influence of aluminum micro powder on the performance of atmospheric environment induced brazed diamond coating [J]. Transactions of the China Welding Institution,



- 2021, 42(12):67-71.
- [14] Xu H T, Li Y F, Lu C Y, et al. An investigation on the vacuum brazed diamond film and copper using low-temperature Ag-Cu-Sn-Ti filler alloys: Interfacial microstructure and mechanical performance [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2023, 581: 154439.
- [15] Wang P, Zhang L, Cheng Z H, et al. Effect of Y on interface characteristics and mechanical properties of brazed diamond with Nisingle bondCr filler alloy [J]. *Diamond & Related Materials*, 2023, 132: 109645.
- [16] 卢金斌, 张旺玺, 张雷, 等. 添加石墨对 Ni-Cr 合金保护气氛钎焊金刚石磨粒界面组织的影响[J]. *机械工程学报*, 2014, 50: 80-84.
LU J B, ZHANG X W, ZHANG L, et al. The effect of adding graphite on the interface microstructure of diamond abrasive particles brazed in Ni Cr alloy under protective atmosphere [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50: 80-84.
- [17] 秦建, 龙伟民, 魏世忠, 等. 激光钎涂金刚石的涂层形成行为及其机理分析[J/OL]. *焊接学报*, 1-9 [2024-10-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1178.TG.20231227.1629.002.html>.
QIN J, LONG W M, WEI S Z, et al. Analysis of Coating Formation Behavior and Mechanism of Laser Brazing Diamond [J/OL]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1-9 [2024-10-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1178.TG.20231227.1629.002.html>.
- [18] 秦建, 龙伟民, 路全彬, 等. 金刚石/NiCrBSi 钎涂接头组织与耐磨性能分析[J]. *材料导报*, 2020, 34(Z2): 457-461.
QIN J, LONG W M, LU Q B, et al. Analysis of microstructure and wear resistance of diamond/NiCrBSi brazed joint [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(Z2): 457-461
- [19] 卢金斌, 徐九华. Ag-Cu-Ti 钎焊金刚石的界面结构及热应力分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38: 642-646.
LU J B, XU J H. Interface Structure and Thermal Stress Analysis of Ag Cu Ti Brazed Diamond [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38: 642-646
- [20] 龙伟民, 刘大双, 吴爱萍, 等. 金刚石粒度及添加量对大气环境感应钎涂层耐磨性的影响[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(12): 225-235.
LONG W M, LIU D S, WU A P, et al. The influence of diamond particle size and addition amount on the wear resistance of atmospheric environment induced brazing coatings [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(12): 225-235.
- [21] 龙伟民, 郝庆乐, 傅玉灿, 等. 金刚石工具钎焊用连接材料研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(12): 23138-23144.
LONG W M, HAO Q L, FU Y C, et al. Research progress on connecting materials for diamond tool brazing [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(12): 23138-23144.
- [22] 王星星, 武胜金, 李帅, 等. 功能性钎涂技术的研究进展与应用现状[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(01): 72-83.
WANG X X, WU S J, LI S, et al. Research progress and application status of functional brazing technology [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(01): 72-83.
- [23] 肖勇. 超声波辅助 Cu/Al 液相焊接头冶金连接机制及性能研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2014.
XIAO Y. Research on the Mechanism and Performance of Ultrasonic Assisted Gold Connection in Cu/Al Liquid Phase Welding Joints [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [24] 秦晋. TiAl3/2024Al 复合材料的超声辅助原位反应制备与性能研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2016.
QIN J. Ultrasonic assisted in-situ reaction preparation and performance study of TiAl3/224Al composite materials [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [25] Wan S, Cui X F, Jin G, et al. Microstructure and properties characterization of laser-cladded Cu-Al alloy coatings on Mg-Li alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 460: 129430.
- [26] 杨卫岐. ZrB₂-SiC 陶瓷连接接头中原位 TiB 晶须生长机制及增强机理研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2014.
YANG W Q. Study on the growth mechanism and reinforcement mechanism of in-situ TiB whiskers in ZrB₂-SiC ceramic joints [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [27] 刘积厚. Cu/Sn/Cu 超声辅助 TLP 连接机理及接头力学性能研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2018.
LIU J H. Study on the Mechanism and Mechanical Properties of Cu/Sn/Cu Ultrasonic Assisted TLP Connection [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [28] Ji H, Wang Q, Li M, et al. Ultrafine-grain and isotropic Cu/SAC305/Cu solder interconnects fabricated by high-intensity ultrasound-assisted solidification [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(7): 2467-2478.