

钛基复合材料焊接研究进展

刘天翼¹, 史 昆¹, 车 昶², 樊秀臣³, 严建强¹, 刘鸿羽¹, 陈晓明¹, 陈 红¹

(1. 沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022;
2. 空军装备部驻辽阳地区军事代表室, 辽宁沈阳 110031; 3. 北京新风航天装备有限公司, 北京 100854)

摘要: 钛基复合材料 (TMCs) 具有优异的力学性能和耐高温性能, 广泛应用于航空航天、汽车制造等领域。作为高性能结构件, TMCs的焊接问题不可避免。为了丰富其产品种类, 拓宽其应用领域范围, 应对其焊接工艺进行研究, 但不同连接方法之间存在一定差异, 在进行TMCs焊接时, 应根据自身特点及需要选择合适的焊接方法。为此, 本文综述了不同TMCs焊接工艺研究, 介绍各种焊接工艺的焊接机理及适用方向。最后, 通过对焊接参数对焊接接头组织和力学性能的影响进行系统阐述, 展望了TMCs焊接未来发展方向。

关键词: 钛基复合材料焊接; 焊接参数; 力学性能; 微观组织

钛基复合材料 (Titanium Matrix Composites, TMCs) 是在钛合金中添加陶瓷增强相的一种新型复合材料, 通过增强相可获得比钛合金更高的比强度、耐磨性、抗腐蚀性以及耐高温性能, 目前TMCs在航空航天、汽车制造和管道运输等领域中应用前景可观^[1-3]。根据强化相的强化形式, TMCs可分为连续纤维增强型 (Fiber Reinforced TMCs, FRTMCs) 和非连续纤维增强型 (Discontinuously Reinforced TMCs, DRTMCs), 其示意图如图1所示^[4]。对FRTMCs的研究较早, 其中以SiC为增强相, 纤维直径100~140 μm时, 复合材料具有最佳的综合性能, 然而SiC连续纤维存在价格昂贵、制备过程复杂、各向异性等缺点, 仅在航空航天领域中得到应用^[5-6]。DRTMCs是以颗粒、晶须和短纤维为强化相, 不仅保持钛合金各向同性的优点, 还因增强相弥散分布, 复合材料综合性能进一步提高^[7]。同时, DRTMCs制备工艺简单, 可通过粉末冶金法, 熔铸法以及机械合金化等方法合成制备, 其原理主要有原位反应自生成技术和外加增强相法^[7-9]。其中由原位反应自生成技术制备的TMCs具有增强体与基体界面洁净、热力学稳定等特点, 目前通过原位反应自生成技术可添加的强化相主要有TiB、TiN、TiB₂、B₄C、ZrB₂、SiC、TiC以及Al₂O₃等, 表1列举了增强体的物理性能, 对比发现, TiB和TiC的热膨胀系数和密度与钛合金的较为接近, 大量研究表明, 它们在基体中表现出良好的化学稳定性和界面结合性, 是最为常用的强化相^[4, 10-15]。



(a) 颗粒增强型

(b) 连续纤维增强型

图1 连续与非连续纤维复合材料示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different types of reinforcements

作者简介:

刘天翼 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事钛合金铸造方面研究。电话 15084047699, E-mail: liutianyi0513@163.com

中图分类号: TG457.19

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2022)

08-0941-09

收稿日期:

2021-12-14 收到初稿,

2022-06-17 收到修订稿。

表1 DRTMCs中常用增强体物理性质
Table 1 Physical properties of the reinforcements commonly used in the DRTMCs

增强相	熔点 / $^{\circ}\text{C}$	密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	热膨胀系数 / ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)
Ti	1 668	4.50	115	9.0
TiB	3 067	4.50	425~480	8.6
TiN	3 290	3.97	250	9.3
TiB ₂	3 225	4.52	~500	4.6~8.1
B ₄ C	2 450	2.51	445	4.78
ZrB ₂	3 373	6.09	503	5.69
SiC	2 970	3.19	430	4.63 (25~500 $^{\circ}\text{C}$)
TiC	3 433	4.99	440	6.52~7.15 (25~500 $^{\circ}\text{C}$)
Al ₂ O ₃	2 323	4.00	420	8.3
Si ₃ N ₄	2 173	3.20	385	2.5
CNTs	~3 379	1.70~2.00	~1 000	-
La ₂ O ₃	2 217	6.51	-	5.8-12.1 (100~1 000 $^{\circ}\text{C}$)

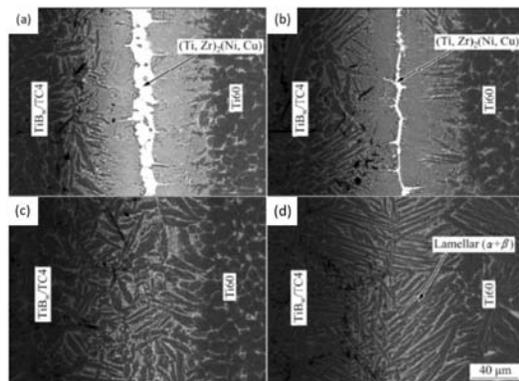
陶瓷颗粒虽然提高了TMCs强度和高温蠕变性能，但是也导致了复合材料变形抗力大、加工性差、变形区域短等问题。通过传统的热加工方法如挤压、锻造和轧制等工艺可以实现TMCs组织细化，提高塑性，但对于大尺寸或形状复杂的零件，这些加工方法很难一次成形^[16]。焊接是解决这一问题的重要手段，近年来对TMCs的焊接研究逐渐增多，主要方法可分为固态焊和熔化焊两种^[17]。在钛基复合材料中，基体焊接性好，陶瓷相焊接性差，两者之间物理和化学性能差异较大，增大了TMCs的焊接难度。不同类型的TMCs的焊接界面结构不同，获得的接头性能存在一定差距，而不同焊接工艺也具有各自的焊接优势，如固相焊中钎焊和扩散焊，具有加热温度低，纤维不被破坏的特点，而熔化焊具有焊接速度快、成本低等优点，但常常会面临增强体偏聚和熔池流动性差等问题^[18-19]。因此，在进行TMCs焊接时，应根据自身特点、接头形式和焊件的服役需求选择合适的焊接工艺。本文通过综述国内外TMCs的焊接研究，介绍了各种焊接工艺的焊接机理及适用方向，阐述焊接参数对焊接接头组织和力学性能的影响，为TMCs的焊接方法选择提供一定的参考。

1 钛基复合材料固态焊

1.1 钎焊

钎焊是在一定温度和保温时间下，通过毛细作用使钎料填满整个焊缝，并与母材发生界面反应和元素扩散，最终实现有效连接的一种焊接工艺。钎焊可连接异种金属及复杂部件，具有加热温度低，界面反应少等优点，但钎焊对工作环境要求较高，需要在惰性气体或真空中进行^[20]。钎焊对于钎料同样有较高的要求，常用于TMCs钎焊的钎料主要有Ti基、Al基、Ag基等钎料，其中Ti基钎料如TiCuNi、TiCu、TiNi和

TiZrCuNi，因熔点高、湿润性好、与基体相容性好，常用于焊接需要具有高温性能的TMCs构件^[21-26]。保温时间和加热温度是钎焊的重要的参数，影响着原子扩散速率，对接头的成形起直接作用^[22,24,26]。在钎焊过程中，这些钎料首先受热融化获得流动性，钎料中的原子在浓度差的作用下快速向基体中扩散，被润湿的Ti原子逐渐溶解于液态钎料中，与钎料中的元素发生反应生成中间层相，在一定保温时间和加热温度下中间层相消失，最终形成组织致密的焊缝^[22,23,25]。Song X G等^[27]使用TiZrNiCu非晶钎料钎焊TiBw/TC4复合材料和Ti60合金，其组织随温度变化规律如图2所示，在940 $^{\circ}\text{C}$ 保温10 min的条件下其长条状的中间层相主要由(Ti, Zr)₂(Ni, Cu)金属间化合物组成，这种化合物属于脆性相，危害接头性能，随着钎焊温度的提高，原子扩散速率加快，中间层相消失，焊缝主要由 α 和 β 混合相组成。保温时间对组织的影响与温度相似，徐海涛^[28]使用Ti-28Ni钎料焊接同种复合材料时，发现延长保温时间焊缝宽度增加，Ni原子持续向基体侧扩散，Ti₂Ni相在焊缝组织中均匀分布，适当的保温时间会获得性能优异的焊接接头，但保温时间过长会使焊缝中出现较多的大尺寸TiC相，危害接头强度。



(a) 900 $^{\circ}\text{C}$; (b) 980 $^{\circ}\text{C}$; (c) 1020 $^{\circ}\text{C}$; (d) 1060 $^{\circ}\text{C}$

图2 不同温度下钎焊接头微观组织

Fig. 2 Microstructures of the brazing joint at different temperatures

钎焊工艺中常常面临连接件之间热膨胀系数不匹配的问题,热膨胀系数相差较大会导致接头临界残余应力高,易使接头发生断裂,此时常常采用复合钎料进行钎焊^[18]。所谓复合钎料是向钎料中添加热膨胀系数低的陶瓷颗粒或短纤维,焊接时陶瓷相在焊缝中均匀分布,具有细化组织、钉扎金属间化合物、阻碍位错运动的作用,同时还具有降低接头在室温和高温下残余热应力的效果^[29-30]。董芸松^[31]使用Ti-Zr-Cu-Ni+TiB复合钎料成功焊接了TiBw/TC4,在焊接过程中产生的TiB晶须尺寸仅为几微米至几十微米,均匀分布在焊缝中,研究表明,B原子不仅消耗焊缝中的Ti原子,还抑制了金属间化合物的生成,在高温条件测试下复合钎料钎焊工艺更具有优势。同样,Lin T^[32]等使用Cu-Ni+TiB₂复合钎料钎焊TiBw/Ti-6Al-4V和C-C复合材料,两者热膨胀系数相差十几倍,结果显示,在钎缝中生成的TiC和TiB陶瓷相削弱了两种材料之间的残余应力。

1.2 扩散焊

扩散焊接是一种固态压力焊接工艺,可实现同种或异种材料之间连接,其原理是原子在焊缝界面相互扩散,在合理的压力和保温时间下,使原子在不含液相的界面上发生迁移,在原子级层面通过键的形成实现整体的有效连接^[33]。扩散焊示意图如图3所示,焊接初期母材的表面条件导致接触时会存在不规则孔隙,在外加压力和温度下,蠕变机制使孔隙开始闭合,此时接触表面的氧化膜发生分解,缝隙中的氧气扩散到母材中,晶界也开始发生迁移,而在孔隙闭合后,界面扩散开始起主要作用,原子相互扩散,形成初始焊缝,对TMCs来说,此时界面处的增强体相会在压力和温度作用下向焊缝处发生迁移,起到强化效果^[34-35]。值得注意的是,TMCs中基体钛合金可以很容易的通过扩散连接且具有较高的结合强度,但直接通过固相连接,在连接处会存在基体-增强体(M-R)和增强体-增强体(R-R)的微观连接形式,这两种连接形式会阻碍基体间的紧密结合^[36]。

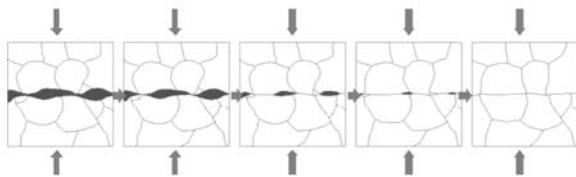


图3 扩散焊接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the diffusion welding

通过在母材之间添加中间层的方法,可有效避免上述连接形式,按照中间层的种类,可分为固态扩散焊和瞬时液相扩散焊。类似于钎焊,固态扩散焊应避

免选择与母材热膨胀系数相差较大的中间层。陈波^[37]等采用Ti-Zr-Cu-Ni中间层对SiC_r/β 21S钛基复合材料进行扩散研究,选取合适的中间层后获得了良好的焊接接头。瞬时液相扩散焊又称为扩散钎焊,当施加热量和压力时,中间层变成液体,改善了中间层和母材之间的表面接触。TMCs在液相扩散焊下连接效果较差,但在液相层中间添加一定厚度的基体金属作为中间过渡层,可获得性能良好的焊接接头。张蕾^[38]等采用自制纤维+TiZrCuNi复合中间层成功焊接SiC_r/TC4复合材料,接头组织与母材接近。同样,Fukumoto S^[39]等用Ti-6Al-4V+Ti-Cu-Zr复合中间层对SiC/Ti-6Al-4V进行扩散焊接,接头强度与母材相似,而采用Ti-6Al-4V进行固相扩散焊,接头拉伸强度仅为母材的90%。加热温度和保温时间是扩散焊接过程中的重要参数,它们影响焊接界面微观组织演变,对焊接接头的性能影响较大。Hirose A^[40]等研究了保温时间对SiC/Ti-6Al-4V焊接接头性能影响,结果表明,随着保温时间的增加,接头剪切强度提高。Antonio^[41]等研究了扩散焊接Ti6-Al-4V/TiC/10P复合材料,在压力为5 MPa,加热温度为1 000 ℃,保温时间为35 min和60 min的焊接条件下获得了性能与母材接近的焊接接头。

1.3 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊是利用搅拌针快速旋转,利用摩擦生热将金属加热至热塑状态,之后在搅拌针的带动下,软化的金属会逐渐流到焊接相反方向,经冷却形成致密的金属间固相连接,属于一种固态连接工艺^[42]。搅拌摩擦焊接对TMCs同样具有一定的优势,但连续纤维在摩擦过程中很容易被破坏,因此该焊接工艺更适用于颗粒增强型钛基复合材料。目前,对于钛合金搅拌摩擦焊的研究相对较多,其焊缝微观组织可分为母材区、热影响区和焊核,在焊核部位,金属发生剧烈的塑性变形,同时由于摩擦产生大量的热,焊接过程中该区易发生动态再结晶,晶粒细化,因此焊核区域也称为再结晶区^[43-44]。搅拌针旋转速度和移动速度是搅拌摩擦焊的两个重要参数,对焊核区和热影响区的微观组织均有较大影响。研究表明,在合适参数条件下,钛合金焊核区主要由尺寸均匀的α等轴晶组成,但增加旋转速度,会导致热输入量增大,超过β相转变温度,发生相组织转变,当焊接薄板时,由于冷却速度较快,出现α+β层片状组织的接头,这种组织不利于接头性能,同样焊接速度过低时,焊核区在高温阶段停留时间过长也会发生这种相组织的转变^[45]。在搅拌摩擦焊接TMCs时,要合理控制焊接参数,但复合材料的一个重要特征是,焊核区的颗粒增强相在连接的早期,温度相对较低的情况下会发生严重的塑性变形,导致颗粒断裂,这些破碎的颗粒降低了搅拌针附

近金属的流动性，因此需要施加更高的轴向压力进行焊接，最终这些强化相会随着搅拌针的旋转流动，均匀分布在再结晶的晶界上^[42,44,46]。Antonio A. M等^[47]用搅拌摩擦焊接了TiC/Ti-6Al-4V复合材料在不同焊接参数下焊缝组织形貌发生变化，如图4所示，通过控制参数变化在较低的旋转速度和低轴向压力下得到了组织均匀的焊接接头，进一步研究显示，增强相在焊缝处具有一定的聚集分布特性，使焊缝区颗粒与基体弹性模量不匹配，导致焊缝处的塑性降低，但硬度得到提高。

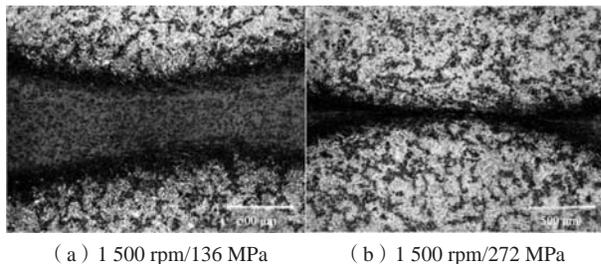


图4 不同焊接参数下焊缝微观组织形貌

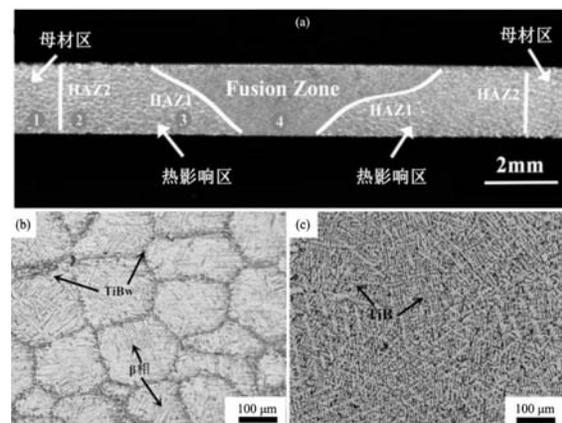
Fig. 4 Microstructure morphologies of the welding joint with different parameters

2 钛基复合材料熔焊

熔焊具有金属损耗小、操作方便、焊接速度快等优点，是连接钛合金最为常用的焊接工艺，根据输入热源的不同，熔焊主要有惰性气体钨极氩弧焊（GTAW）、激光束焊（LBW）和电子束焊（EBW）^[48]。TMCs的熔焊过程与钛合金相似，不同的是，在高温熔化过程中，由于TMCs中基体与增强相之间存在一定的熔点差异，熔池粘度因陶瓷相而增大，液态金属流动性变差，增强相容易在焊缝中发生偏聚^[49]。同时，由于熔焊温度高，基体与陶瓷颗粒还会发生界面反应，剧烈的化学反应会生成气泡，形成焊接缺陷^[50]。判断熔焊焊接接头的质量可通过接头的完整性、组织连续性以及性能均匀性三个方面进行评判，因此对接头的宏观、微观特征和力学性能的研究就显得至关重要^[51]。TMCs熔焊中基体与陶瓷相经历了快速升温、熔化并凝固，在此期间还伴随着相组织的析出与重新分布，但由于基体钛合金导热性较差，在这种热循环作用下，焊缝部位会存在一定的温度梯度，导致陶瓷相和基体组织在整个焊缝的不同区域呈现出明显的差异性。在上述的三种熔焊工艺中，焊缝的凝固结晶和生长方式以及组织转变过程大体相同，具有相似的微观焊缝区域分布，如图5a所示，类似于钛合金熔焊，这些区域主要分为熔化区（FZ）、热影响区（HAZ1和HAZ2）以及母材区^[19,50-53,56]。

研究表明，TMCs熔焊温度一般在 β 相转变温度以上，但冷却过程十分迅速， β 相来不及通过溶质原子扩散转变为 α 相，而是形成了过固溶马氏体 α' 相，因

此熔化区中多为单一的 α' 相组织^[52]。在焊缝凝固过程中，陶瓷颗粒与基体相互影响，研究发现，熔化区冷却时 β 晶粒先行析出，陶瓷相会重新在 β 柱状晶界上析出，沿着晶界呈网状分布，而陶瓷相的存在会阻碍基体晶粒的长大，实现组织细化，如图5b、5c所示。在熔焊TiB/TC4时，有学者认为，B原子的析出使溶质原子处于过饱和状态，导致固-液界面前沿溶质原子发生富集，发生液相连续成分过冷的现象，这为后续凝固结晶提供形核驱动力，使 β 相形核速率提高，最终细化晶粒尺寸^[54]。而其他研究表明，共晶析出的TiB为 β 相的形成与转变提供驱动力，进而提高相形核速率，最终得到均匀的微观组织^[55]。陶瓷相与基体的这种相互影响效果不仅降低晶粒尺寸，还使增强相呈现出相较于基体中更为细长的纤维状形貌，而高长径比的纤维被认为具有更好的强化效果^[55]。



(a) 截面宏观；(b) 热影响区；(c) 熔化区

图5 TiB/TC4复合材料焊后微观组织

Fig. 5 Microstructures of the TiB/TC4 composites after welding

靠近熔化区的为HAZ1，该区域受热循环影响较大，但未发生熔化，原始 α 相并未全部转变为 β 相，具有晶粒尺寸粗大， α 和 α' 两相共存的特点。而靠近母材的HAZ2受热循环影响较小，其微观组织与母材相似，从HAZ1到HAZ2的过渡过程中， α' 相含量逐渐降低^[52]。钛合金中常见相组织和强度的变化关系为：马氏体 α' 相 $>$ α 相 $>$ β 相，因此根据焊缝不同区域组织分布，焊缝硬度值变化为：熔化区 $>$ 热影响区 $>$ 母材区^[52,58]。TMCs中焊缝中心向母材方向硬度逐渐降低，熔化区因细晶和网篮状组织硬度最大，热影响区硬度低于熔化区是因为距离熔化区越远，受热循环影响降低，马氏体 α' 含量逐渐减少，且热影响区中陶瓷颗粒通过元素的剧烈扩散分裂成细长晶须，并向周围扩散，导致强化效果降低^[49]。总之，焊缝不同位置的微观形貌存在着差异，而在使用熔焊焊接TMCs时，焊接参数同样影响着焊缝宏观与微观的结构和组织变化，下面将详细介绍三种焊接工艺的焊接参数对焊缝的形

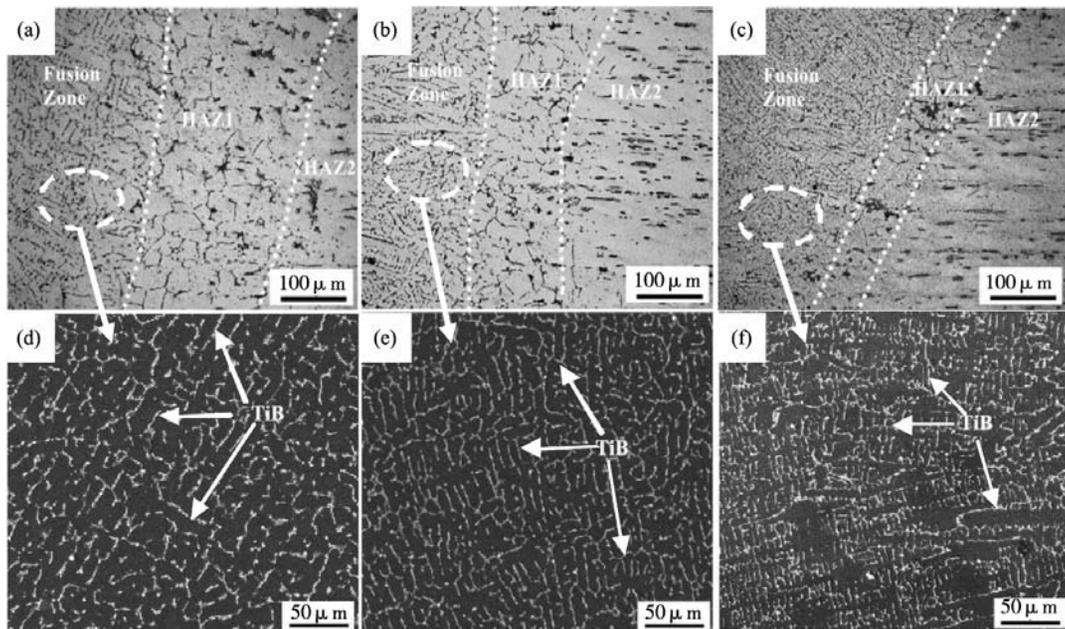
成变化以及力学性能的影响。

2.1 惰性气体钨极氩弧焊 (GTAW)

GTAW是利用电极放电产生电弧热,在惰性气体保护下使待焊件快速熔化和冷却,实现材料间的有效连接,具有成本低、操作方便、实用性强等优点,适合大部分有色金属的焊接。GTAW的焊接参数主要有焊接电流和焊接速度,两者具有相反的影响关系,通过改变焊接热的输入,影响焊接的整个过程^[56]。宏观上,当焊接电流较小或焊接速度较大时,输入到单位长度上的能量过低,焊缝背面会形成不连续焊缝,即出现未焊透的现象,带有这种缺陷的焊件容易因应力集中而发生断裂。而当焊接电流较大或焊接速度较小时,均会使单位长度上输入的能量过高,进而导致

更多的母材融化,在电弧力的作用下液态金属向下移动,形成上凹下凸的宏观形貌,在焊接TMCs时应避免出现这种结构^[18,52]。

不同焊接速度焊缝微观组织变化如图6所示^[52],在合理的焊接热输入范围内,降低焊接速度,焊接热输入增加,焊缝区过冷度降低,形核速率下降,晶粒长大,此时陶瓷相TiB随着焊接速度的降低在晶界上有充足的生长时间,尺寸增加,长径比降低。同时,随着焊接热增加,HAZ1宽度增加,晶粒尺寸增大,而HAZ2受焊接速度变化影响不大,组织和母材类似,未有明显变化^[52,57]。焊接电流对焊缝组织的影响效果与焊接速度相反,两者共同影响着TMCs的熔焊过程,因此,为获得良好质量的焊缝,应合理的调控焊接电流和焊接速度,使二者相匹配。



(a) (d) 15 cm/min; (b) (e) 30 cm/min; (c) (f) 60 cm/min

图6 不同焊接速度下焊缝组织

Fig. 6 The microstructures of the welding under different welding speeds

2.2 激光束焊 (LBW)

激光束焊是一种新型连接技术,利用高能量密度的激光束作为热源进行高效精密焊接,相比于氩弧焊,激光束焊具有穿透深、热输入量少、焊接速度快、接头热变形和热影响区小、组织细等优点,在满足机械刚度、强度条件下可进行复杂结构件的有效焊接,在航空工业中具有很大的应用前景^[59]。目前,对于钛合金的激光焊研究相对较多,焊缝质量受激光功率、焊接速度和离焦量的共同作用影响^[60]。Bharti A^[61]研究了焊接功率和焊接速度对焊缝熔宽的影响,结果如图7a所示,提高焊接功率或降低焊接速度,焊透深

度增加,这与氩弧焊结果相似。激光焦点与基体金属平面之间的距离称为离焦量,其与焊接功率共同影响功率密度。离焦量过大或过小均会降低功率密度,而在低功率下会出现不完全焊透的焊接缺陷^[52]。

在焊接TMCs时,激光焊熔池温度高,增强体与基体之间必然会发生界面反应,研究表明,可以通过在两个母材之间加入填充金属片等措施减少反应发生,但在焊接钛合金时发现,虽然使用填充丝有助于改善焊缝区和弥补挥发性合金元素的损失,但也会略微地增加焊缝的孔隙率^[62-63]。Ozerov M^[64]等用激光焊焊接了Ti-15Mo/TiB复合材料,在焊缝区和热影响区中出现

200~300 μm 的气孔, 这些气孔的形成主要与基体中溶解氢引起的气泡有关, 在熔化区中TiB晶须呈束状分布, 尺寸得到明显细化, 与基体中的TiB形貌存在一定差异。通过原位自生方法获得的(TiB+La₂O₃)/Ti复合材料, 在焊接过程中增强体与钛基体之间无界面反应, 是较为理想的钛基复合材料。Mao J W^[65]在焊接这种复合材料时, 在严格的清理工作和预防下气孔数量明显降低, 获得了良好的焊接接头, 与氩弧焊进行对

比发现, 激光焊具有热输入精准控制, 单位长度上输入的能量相对较低, 有较快的冷却速度, 通过激光焊获得的焊缝组织分布更加均匀, 焊缝的硬度随焊接参数的变化如图7b、c所示^[61, 64], 功率为1.5 kW或焊接速度为1.6 m/min时, 熔化区硬度最高, 离焦量对焊缝影响较小, 在合理的离焦量下, 即使焊接电流和焊接速度不同, 焊缝均能均匀成形。

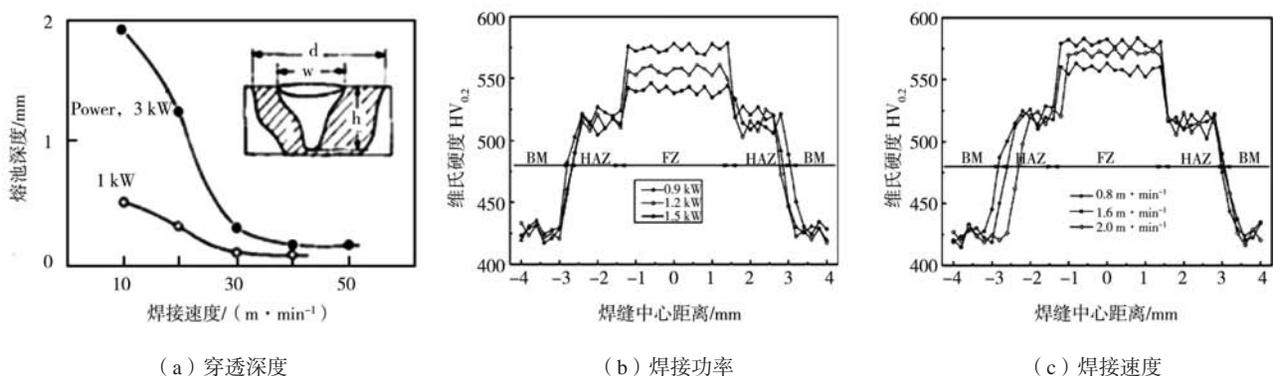


图7 焊接功率和焊接速度对穿透深度及焊缝硬度的影响

Fig.7 Influences of welding power and welding speed on the penetration depth and hardness of the weld zone

2.3 电子束焊 (EBW)

电子束焊是利用加速和聚焦的电子束轰击焊件表面, 因其加热能量来自电子流动能, 须在真空中进行焊接, 可有效避免钛合金在高温下和熔融状态下与空气中的氧气、氮气和氢气发生反应^[66]。相比于上述两种焊接工艺, 电子束焊有更快的加热和冷却速度, 焊缝在凝固过程中具有更高的过冷度, 形核速度更快, 焊缝组织中晶粒十分均匀, 熔化区和热影响区更窄, 可以得到光滑的焊接接头^[67]。电子束焊已应用于钛合金的连接, 但电子束焊焊接工艺复杂, 需控制的参数较多, 如焊接速度、扫描参数、焊接束流、聚焦电流等, TMCs的组成较为复杂, 焊接过程更为复杂, 目前对于TMCs电子束焊研究的有关报道相对较少。Laboda P^[68]用电子束焊接了Ti-TiB钛合金, 结果表明, 焊缝熔体快速结晶的条件有利于TiB增强纤维的细化, 长径比显著增加, 但超细的TiB纤维引起了材料的脆性。李宁^[69]通过控制不同的焊接参数, 对电子束焊接工艺进行优化, 获得了焊接TiBw/TC4复合材料的最佳焊接参数, 在使用较低焊接速度且添加电子束扫描的情况下焊缝成形稳定、美观, 气孔数量低, 无焊接缺陷的电子束接头。其微观组织和力学性能如图8所示^[69], 在焊缝区中TiB沿着晶界析出, 基体组织为细小的网篮组织, 电子束焊后的组织十分均匀, 焊缝不同区域之间的硬度值相差不大。

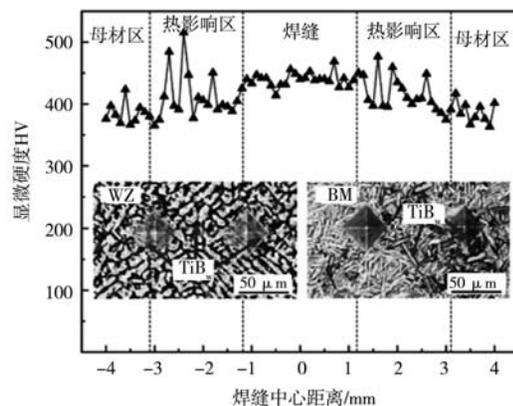


图8 电子束焊缝显微硬度变化

Fig. 8 Hardness changes of different weld zones by the electron beam welding

3 结语

TMCs因陶瓷相获得良好的综合性能, 但也给其二次加工带来了诸多困难, 作为一种新型结构材料, 焊接问题在其未来发展中难以避免。固态焊十分适合TMCs的焊接, 其中钎焊和扩散焊虽然可以焊接同种和异种材料, 界面反应相对较少, 但这两种焊接方法生产效率低, 应用范围十分有限, 容易产生具有危害的脆性中间层相, 获得的焊接接头力学性能较差, 无法

满足需要高强度的TMCs结构件。搅拌摩擦焊可获得组织均匀的焊接接头,但由于需要添加轴向压力,导致其设备复杂,只能对尺寸小、结构简单的构件进行焊接。

氩弧焊具有操作方便、成本低、焊缝强度高等优点,被广泛应用于TMCs焊接,但氩弧焊热输入大,造成熔池温度高,界面反应剧烈,对母材的损伤较大。通过合理的控制焊接电流和焊接速度,使二者相匹配可获得性能优良的焊接接头,近年来通过对改进氩弧焊,利用焊接电流产生周期性变化,形成新型的脉冲氩弧焊,降低熔池温度,实现精确控制热输入,增加熔池流动性和冷却速度,在一定程度上降低界面反

应,提高焊缝表面的成形质量。激光束焊可进一步降低焊接热输入能量,焊接速度快,但需要合理控制激光功率和焊接速度,同时在焊接前应进行严格的清理工作来避免焊缝中气孔的生成。最后,电子束焊能量集中,热效率高,获得的焊缝组织致密且均匀,焊缝屈服强度与塑性均接近于母材。虽然电子束焊工艺参数较多,但合理的焊接参数下焊缝内气孔数量少,同时电子束对熔池有搅拌效果,焊缝质量也进一步得到提高。总之,熔焊工艺对TMCs焊接优势巨大,其中电子束焊因焊缝稳定、气孔少、质量高,在未来TMCs焊接中有较大的发展潜力。

参考文献:

- [1] 宋卫东, 宁建国, 毛小南. TiC颗粒增强钛基复合材料细观动态力学性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40 (9): 1555-1560.
- [2] 曹玉鹏, 戴志强, 刘建涛, 等. 金属基复合材料研究进展及展望 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (10): 2319-2322.
- [3] HUANG L J, LU C J, YUAN B, et al. Comparative study on superplastic tensile behaviors of the as-extruded Ti6Al4V alloys and TiBw/Ti6Al4V composites with tailored architecture [J]. Materials & Design, 2016, 93 (3): 81-90.
- [4] HAYAT M D, SINGH H, HE Z, et al. Titanium metal matrix composites: An overview [J]. Composites Part A, 2019, 121: 418-438.
- [5] GUO S. Fiber size effects on mechanical behaviours of SiC fibres-reinforced Ti_3AlC_2 matrix composites [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37 (15): 5099-104.
- [6] MA F C, LU S Y, LIU P, et al. Evolution of strength and fibers orientation of a short-fibers reinforced Ti-matrix composite after extrusion [J]. Materials & Design, 2017, 126: 297-304.
- [7] 吕维洁, 张荻. 原位合成钛基复合材料的制备、微结构及力学性能 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [8] 付彬国, 李朝志, 刘金海, 等. 原位合成技术在非连续增强钛基复合材料中的应用及展望 [J]. 铸造, 2018, 67 (4): 312-316.
- [9] YANG J, HUANG L J, LIN G. Progress on discontinuously reinforced titanium matrix composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 767: 1196-1215.
- [10] 彭德林, 赵璐华, 杜立明. 陶瓷颗粒增强钛基复合材料的研究进展 [J]. 钛工业进展, 2010, 27 (2): 1-8.
- [11] 郑博文, 袁晓光, 董福宇, 等. La_2O_3 含量对 (TiC+TiB)/IMI834复合材料组织及耐磨性的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (8): 933-938.
- [12] GENG L, NI D R, ZHANG J, et al. Hybrid effect of TiBw and TiCp on tensile properties of in situ titanium matrix composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 463 (1-2): 488-492.
- [13] 王悔改, 陈慧敏, 王非. 原位自生钛基复合材料高温氧化表面分析 [J]. 铸造, 2009, 58 (1): 39-42.
- [14] DOUGHERTY T, XU Y, HANIZAN A. Mechanical properties and microstructure of PM Ti-Si3N4 discontinuous fibre composite [C]//TMS 2016 145th Annual Meeting & Exhibition. Springer, Cham, 2016: 721-728.
- [15] SHIVAKUMAR N, et al. Synthesis and characterization of nano-sized Al_2O_3 particle reinforced ZA-27 metal matrix composites [J]. Procedia Materials Science, 2015, 10: 159-167.
- [16] SAEID G T, SEYED Abdolkarim S. Influence of spark plasma sintering and subsequent hot rolling on microstructure and flexural behavior of in-situ TiB and TiC reinforced Ti6Al4V composite [J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 624: 271-278.
- [17] 韩远飞, 孙相龙, 邱培坤, 等. 颗粒增强钛基复合材料先进加工技术研究及进展 [J]. 复合材料学报, 2017, 34 (8): 1625-1635.
- [18] 许文龙, 张相召, 杨露瑶, 等. 陶瓷增强钛基复合材料焊接的研究进展 [J]. 中国材料进展, 2019, 38 (7): 696-704, 716.
- [19] 潘玉维, 毛建伟, 张立新. 钛基复合材料TIG焊接接头的显微组织和拉伸性能 [J]. 机械工程材料, 2020, 44 (5): 1-5, 53.
- [20] LI Y X, CHEN C. Review: Special brazing and soldering [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60: 608-635.
- [21] SONG X G, CAO J, WANG Y F, et al. Effect of Si3N4-particles addition in Ag-Cu-Ti filler alloy on Si_3N_4 /TiAl brazed joint [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (15): 5135-5140.
- [22] DONG D, XU H T, ZHU D D, et al. Microstructure and mechanical properties of TiC/Ti matrix composites and Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy joints brazed with Ti-28Ni eutectic filler alloy [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, 19 (4): 1259-1267.
- [23] LI M, SHI K, ZHU D, et al. Microstructure and mechanical properties of Si_3N_4 ceramic and (TiB+ Y_2O_3)/Ti matrix composite joints brazed with AgCu/Cu foam/AgCu multilayered filler [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 220-227.
- [24] DONG D, ZHU D D, ZHENG H X, et al. Brazing TiC/Ti matrix composite using TiNi eutectic braze alloy [J]. Vacuum, 2018, 156:

411-418.

- [25] HAO T, HE J C, HOU J B, et al. Analysis of the microstructure and mechanical properties of TiBw/Ti-6Al-4V Ti matrix composite joint fabricated using TiCuNiZr amorphous brazing filler metal [J]. *Materials*, 2021, 14 (4): 875-875.
- [26] ZHU D D, XU H T, DONG D, et al. Brazing of (TiB+Y₂O₃) reinforced titanium matrix composites using CuTiZrNi amorphous filler alloy[J]. *Vacuum*, 2020, 174 (C): 109212-109212.
- [27] SONG X G, ZHANG T, FENG Y J, et al. Brazing of TiBw/TC4 composite and Ti60 alloy using TiZrNiCu amorphous filler alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27 (10): 2193-2201.
- [28] 徐海涛, 张光胜, 朱冬冬, 等. Ti-28Ni钎料钎焊Ti合金接头组织与性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2017, 40 (6): 30-34.
- [29] 黄鹏, 朱冬冬, 王刚. TiZrHfNbMo高熵合金与钛基复合材料钎焊接头组织及力学性能[J]. *航空材料学报*, 2020, 40 (4): 52-61.
- [30] LIN G B, HUANG J H. Brazed joints of Cf-SiC composite to Ti alloy using Ag-Cu-Ti- (Ti+C) mixed powder as interlayer [J]. *Powder Metallurgy*, 2006, 49 (4): 345-348.
- [31] 董芸松. TiBw/TC4复合材料的钎焊工艺与组织性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [32] LIN T, YANG M, PENG H, ET al. Effect of in situ synthesized TiB whisker on microstructure and mechanical properties of carbon-carbon composite and TiBw/Ti-6Al-4V composite joint [J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (8-9): 4553-4558.
- [33] WEI Y, WU A, ZOU G, et al. Formation process of the bonding joint in Ti/Al diffusion bonding [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2008, 480 (1-2): 456-463.
- [34] 湛聪. Ti6Al4V基复合材料扩散连接工艺及界面扩散机理研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [35] LEE H S, YOON J H, CHO W H. Formation mechanism of diffusion welded joint[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 1261 (228-229): 666-671.
- [36] 陈茂爱, 陈俊华, 高进强. 复合材料的焊接 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [37] 陈波, 熊华平, 毛唯, 等. 采用Ti-Zr-Cu-Ni钎料钎焊SiC纤维增强钛基复合材料的接头组织与性能 [J]. *材料工程*, 2009 (6): 10-14.
- [38] 张蕾, 侯金保. SiC纤维增强钛基复合材料过渡液相扩散焊接接头组织研究 [J]. *航空材料学报*, 2006 (3): 325-326.
- [39] FUKUMOTO S, HIROSE A, KOBAYASHI K F. An effective joint of continuous SiC/Ti-6Al-4V composites by diffusion bonding [J]. *Composites Engineering*, 1995, 5 (8): 1081-1089.
- [40] HIROSE A, KOTOH M, FUKUMOTO S, et al. Diffusion bonding of SiC fibre reinforced Ti-6Al-4V alloy [J]. *Metal Science Journal*, 1992, 8 (9): 811-816.
- [41] ANTONIO A M, SILVA D, JORGE F. et al. An investigation of the fracture behaviour of diffusion-bonded Ti6Al4V/TiC/10p [J]. *Composites Science & Technology*, 2006, 66 (13): 2063-2068.
- [42] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing [J]. *Materials Science & Engineering R*, 2005, 50 (1-2): 1-78
- [43] 刘德波, 鹿华艳. 搅拌摩擦焊工艺对钛基复合材料焊缝原位自生组织的影响 [J]. *铸造技术*, 2017, 38 (8): 1995-1997.
- [44] PARIKH V K, BADGUJAR A D, GHETIYA N D. Joining of metal matrix composites using friction stir welding: a review [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019, 34 (2): 123-146.
- [45] 李继忠, 董春林, 赵华夏, 等. 钛合金搅拌摩擦焊工艺参数对组织性能的影响 [J]. *航空制造技术*, 2015 (17): 100-103.
- [46] 于治水, 李瑞峰, 祁凯. 金属基复合材料连接方法研究综述 [J]. *热加工工艺*, 2006 (2): 44-48.
- [47] ANTONIO A M, SILVA D, AXEL M, et al. Mechanical and metallurgical properties of friction-welded TiC particulate reinforced Ti-6Al-4V [J]. *Composites science and technology*, 2004, 64 (10/11): 1495-1501.
- [48] SHORT A B. Gas tungsten arc welding of $\alpha + \beta$ titanium alloys: a review [J]. *Materials Science and Technology*, 2009, 25 (3): 309-324.
- [49] MAO J W, HAN Y F, LU W J, et al. Investigation of the effect of argon arc welding parameters on properties of thin plate of in situ titanium matrix composites [C]. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2016, 849: 436-442.
- [50] OZEROV Maxim. Laser beam welding of a Ti-15Mo/TiB metal-matrix composite [J]. *Metals*, 2021, 11 (3): 506-506.
- [51] 段天博. 网状结构TiBw/TC4复合材料板材钎焊的组织与性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [52] 毛建伟. 原位钛基复合材料的焊接工艺与机理研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [53] LI N, WANG T, JIANG S Y, et al. Microstructure evolution and strengthening mechanism of electron beam welded TiBw/Ti6Al4V composite joint [J]. *Materials Characterization*, 2021, (6): 1-10
- [54] SEN I, TAMIRISAKANDALA S, MIRACLE D B. Microstructural effects on the mechanical behavior of B-modified Ti-6Al-4V alloys. *Acta Materialia*, 2007, 55: 4983-4993
- [55] KOO M Y, PARK J S, PARK M K. Effect of aspect ratios of in situ formed TiB whiskers on the mechanical properties of TiBw/Ti-6Al-4V composites [J]. *Scripta materialia*, 2012, 66 (7): 487-490.
- [56] HUANG L, DUAN T, AN Q, et al. Gas tungsten arc welding of network structured titanium matrix composite [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, 23 (5): 357-364.
- [57] MAO J W, WANG M M, WANG L Q, et al. Weld zone characteristic and mechanical performance of in situ titanium matrix composites

- using gas tungsten arc welding (GTAW) [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17 (8): 630-635.
- [58] ZENG L, BIELER T R. Effects of working, heat treatment, and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of α , α' , α'' and β phases in Ti-6Al-4V wire [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2004, 392 (1): 403-414.
- [59] AUWAL S T, RAMESH S, YUSOF F, et al. A review on laser beam welding of titanium alloys [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97 (1-4): 1071-1098.
- [60] KABIR A S H, CAO X, MEDRAJ M, et al. Effect of welding speed and defocusing distance on the quality of laser welded Ti-6Al-4V [J]. *Laser Applications in Materials Processing*, 2010: 2787-2797.
- [61] BHARTI A. Laser welding [J]. *Bulletin of Materials Science*, 1988, 11 (2-3): 191-212.
- [62] CAO X J, DEBAECKER G, JAHAZI M, et al. Effect of post-weld heat treatment on Nd: YAG laser welded Ti-6Al-4V alloy quality [J]. *Materials Science Forum*, 2010, 638-642: 3655-3660.
- [63] 陈彦宾, 张德库, 牛济泰, 等. 激光焊接铝基复合材料钛的原位增强作用 [J]. *应用激光*, 2020 (3): 320-322, 338.
- [64] OZEROV M, POVOLYAEVA E, STEPANOV N, et al. Laser beam welding of a Ti-15Mo/TiB metal-matrix composite [J]. *Metals*, 2021, 11 (3): 506-517.
- [65] MAO J W, LU W J, WANG L Q, et al. Microstructures and mechanical properties in laser beam welds of titanium matrix composites [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19 (2): 142-149.
- [66] 马正斌, 刘金合, 卢施宇, 等. 电子束焊接技术研究及进展 [J]. *电焊机*, 2012, 42 (4): 93-96.
- [67] 张仕林. ($\alpha + \beta$) 钛合金电子束焊接接头显微组织及力学性能研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [68] LOBODA P, ZVORYKIN C, ZVORYKIN V, et al. Production and properties of electron-beam-welded joints on Ti-TiB titanium alloys [J]. *Metals*, 2020, 10 (4): 522-543.
- [69] 李宁. TiBw/TC4复合材料电子束焊接接头组织与性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

Research Process on Welding of Titanium Matrix Composites

LIU Tian-yi¹, SHI Kun¹, CHE Chang², FAN Xiu-chen³, YAN Jian-qiang¹, LIU Hong-yu¹, CHEN Xiao-ming¹, CHEN Hong¹

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co. Ltd, State Key Laboratory of Light Alloy Foundry Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Liaoyang, Shenyang 110031, Liaoning, China; 3. Beijing Xinfeng Aerospace Equipment Co. Ltd, Beijing 100854, Beijing, China)

Abstract:

Titanium matrix composites (TMCs) have been widely used in aerospace, automobile manufacturing and other fields due to their excellent mechanical properties and high temperature resistance. As a high performance structural material, the welding problems of the TMCs are inevitable. Therefore, in order to enrich the types of the TMCs products and broaden the scope of their application fields, the welding process should be studied. However, there are some differences between different joining methods. When joining the TMCs, appropriate welding process should be selected according to its own characteristics and needs. In this paper, different TMCs joining processes were reviewed, and then the mechanism and application direction of the TMCs connection method were also introduced. Finally, the influence of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of welded joints was systematically described, and the future development direction of the TMCs welding was proposed.

Key words:

titanium matrix composite welding; welding parameters; mechanical properties; microstructure
