

传统扩散连接在金属材料加工中的研究及应用

赵金辉, 郭婧, 张浩宇

华北理工大学冶金与能源学院 河北唐山 063210

摘要: 高性能金属材料往往离不开好的加工工艺, 扩散连接技术在金属材料领域发挥着重要作用。介绍了扩散连接技术的基本原理, 解释了材料的固态扩散过程, 以及与传统焊接方法相比的优势。讨论了扩散连接的影响因素, 包括工艺参数、元素扩散和界面结合强度与断裂机理, 尤其是温度、压强、保温时间对接头强度的影响。探讨了扩散连接在航空航天、核能领域的应用, 并对扩散连接的进一步研究方向提出了建议。

关键词: 传统扩散连接; 工艺参数; 界面结合强度; 断裂机理

Research and application of traditional diffusion bonding in metal material processing

ZHAO Jinhui, GUO Jing, ZHANG Haoyu

College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China

Abstract: High-performance metal materials are often inseparable from better processing technology, and diffusion bonding technology plays an important role in the field of metal materials. The basic principle of diffusion bonding technology is introduced, the solid state diffusion process of materials is expounded, and the advantages compared with traditional bonding methods are expounded. The influencing factors of diffusion bonding are discussed, including process parameters, element diffusion, interfacial bonding strength and fracture mechanism, especially the influence of temperature, pressure and holding time on joint strength. The applications of diffusion bonding in aerospace and nuclear energy are discussed, and the further research direction of diffusion bonding is put forward.

Keywords: traditional diffusion bonding; process parameters; interfacial bonding strength; fracture mechanism

1 序言

金属材料加工在现代社会中扮演着不可或缺的角色。它为各个领域提供了关键材料和零件, 从汽车和航空航天到电子设备和建筑结构, 都离不开金属材料加工的支持^[1-3]。扩散连接(Diffusion Bonding)技术在金属材料加工中的应用及研究一直备受关注。这项技术为金属材料的加工和制造提供了一种独特而强大的工具, 不仅可以实现金属零件的高效连接, 还能够精确控制材料的性能和结构^[4-6]。随着科学技术的不断进步, 扩散连接技术已经成为制造业和工程领域的重要一环, 对于提高产品质

量、减少材料浪费、降低生产成本以及推动可持续发展发挥了关键作用。

扩散连接是一种材料连接技术, 在一定温度、时间、压力条件下, 将两个待连接的零件焊接面紧密接触, 在固态状态下进行一段时间原子扩散, 发生局部塑性变形, 从而在其接触界面形成牢固的结合^[7]。相比于焊接、黏合、涂覆及沉积等传统连接方法^[8], 扩散连接技术不仅可直接连接同种金属或非金属, 还可以实现性能相差较大的异种材料之间的连接^[9]。由于基体在扩散过程中不熔化, 可实现尺寸差别较大且结构复杂零件的精密连接^[10]。正是

由于诸多优点,扩散连接技术备受科研人员关注,广泛应用于航空航天、能源、汽车和电子化工等领域,在金属材料加工中发挥着越来越重要的作用。

本文深入研究传统扩散连接技术在金属材料加工中的关键影响因素,包括工艺参数、元素扩散动力学和连接界面的结合强度与断裂机理。通过深刻理解这些因素,为金属材料的加工工艺提供更为科学的指导,推动传统扩散连接技术在工程实践中的广泛应用。

2 传统扩散连接(DB)原理

钎焊作为一种常见的材料连接方法,尽管工艺简单、成本低廉,但焊接过程涉及高温熔化和冷却过程,这可能导致接头性能和结构发生变化^[9]。钎焊通常需要选用焊接材料,而焊接材料的性能可能在高温环境下受到限制。钎焊对材料的选择和兼容性要求较高,不同种类的材料通常需要不同类型的焊接工艺和焊接材料^[11]。与其相比,扩散连接具有明显优势^[12]:基体金属在扩散过程中不熔化;可用于不同金属间的连接,扩散连接时所需的温度较低;连接接头残余应力较小;不需要其他金属材料作为钎剂,界面清洁无污染,连接接头力学性能较高。

传统扩散连接是在一定的温度和压力条件下,使两个或多个材料在固态状态下进行原子扩散,从而在其接触界面形成牢固的结合。这种连接方法不需要外部的熔融材料,而是利用固态原子扩散的特性,在材料接触界面形成化学键和晶格间的相互扩散,从而实现强度较高、界面无缺陷的连接。

扩散连接过程可大致分为3个阶段^[13]:物理接触阶段、晶界迁移阶段、空洞消失阶段。在材料刚开始接触时(见图1a),接触表面粗糙,存在大量空洞。在物理接触阶段,表面在温度和压力作用下接触面积增加,空洞变小(见图1b)。随着温度和压力的增加,空洞逐渐消失,晶界发生迁移(见图1c),两界面实现一定的连接。在保温一段时间后,界面空洞完全消失(见图1d),形成可靠的连接。

3 工艺参数对接头性能的影响

扩散连接接头的性能是决定扩散连接好坏的关

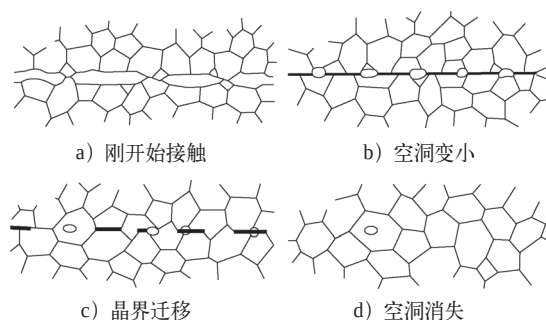


图1 扩散连接过程示意图^[13]

键因素,选择合适的工艺参数(如温度、压力和保温时间)至关重要。合理选择这些工艺参数可提高接头的质量和性能。

3.1 温度对连接接头的影响

温度是扩散过程中一个关键参数。不同类型的材料在不同的温度下扩散性能会有差异。温度选择应考虑到要连接材料的熔点和热性能。通常,扩散连接的温度应低于材料的熔点,避免完全熔化。较高的温度通常会增加原子的扩散速率,加速扩散过程,有助于更好地形成连接,因此合理选择温度是决定接头性能的重要指标。SHI等^[14]以Ni为中间层研究了温度对FGH98高温合金和DD5单晶扩散连接的影响,扩散连接温度对FGH98/DD5接头组织有显著影响。随着扩散连接温度的升高,基体材料与Ni中间层之间的元素互相扩散增加,Ni层区的硬度和接头的剪切强度都有所提高。这表明温度升高促进了基体中Al、Ti、Cr与中间层中Ni原子的扩散速率,加速了扩散过程,形成了更多的间隙化合物,从而提高了连接界面的强度和硬度。

温度的变化会直接影响连接的质量。适当的温度条件有助于确保连接表面之间的有效接触,形成均匀、致密的连接。高温下会形成更完整的连接,提高连接接头的质量。ZENG等^[15]研究了连接温度对Zr705合金扩散连接接头组织和性能的影响,发现基体材料在不同的连接温度下的微观组织形态不同。接头的抗拉强度随着温度的升高而增加,从900℃升高到960℃,Zr705合金的扩散焊接头的极限抗拉强度(UTS)从78MPa增加到最大603MPa。随着温度的升高,接头断裂方式也由脆性断裂转为韧性断裂。正是由于温度的升高,使连接界面精密无缝,性能也得到大幅度提升。

温度对晶界再结晶和晶粒长大过程也有显著

影响。合适的温度可以促使晶体内部的原子重新排列,改善晶体结构,从而影响连接接头的力学性能。WANG等^[16]研究了扩散连接温度保温对扩散连接Zr-4合金接头界面微观结构和力学性能的影响。温度升高会导致晶粒变粗,并形成脆性第二相。随着连接温度的升高,Zr-4连接接头的界面结合率从74%逐渐提高到95%。最高剪切强度为349MPa。LIN等^[17]引入纳米结构镍表面层,研究了温度对增强哈氏合金扩散连接的影响。扩散连接温度高于纳米结构Ni的不稳定温度,使其发生了快速完全的再结晶和剧烈的晶粒生长,增强了扩散作用,使所获得的接头抗拉强度达到833MPa,与基体的抗拉强度几乎相等。

扩散连接温度虽然能提高连接接头的性能,但并不是温度越高性能就越好。较高的连接温度除了耗费更多的能源外,还有学者发现随着连接温度的升高,界面连接强度表现出先升高后降低的趋势。孙怀等^[18]研究了钨合金与不锈钢的扩散连接,对钨合金90W-7Ni-3Cu和304不锈钢采用低温扩散连接。温度设置为800℃、850℃、900℃、950℃,工艺曲线如图2所示。以5℃/min的速率升温到连接温度,保温2h进行扩散连接,然后降温至650℃,保温2h,减小试件的残余应力,之后随炉冷却至室温。测试了不同温度下连接试样的界面强度,其真应力-真应变曲线如图3所示。界面强度随温度变化曲线如图4所示。在800~950℃、20MPa、2h工艺参数下,实现了钨合金与不锈钢的高性能连接。当连接温度由800℃升高到900℃时,界面强度也随之增强,当连接温度由900℃升高至950℃,界面强度随温度升高而下降。在900℃时连接界面具有最大抗拉强度

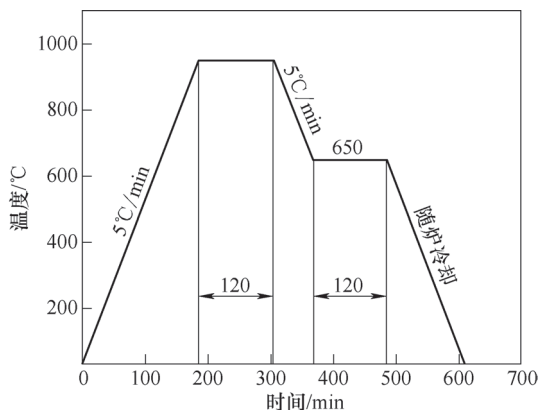


图2 扩散连接工艺曲线^[18]

168MPa,因此,确定最佳温度对于扩散连接过程至关重要。

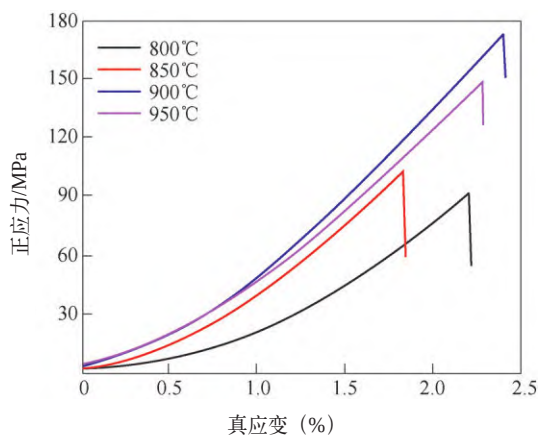


图3 不同连接温度试件界面拉伸正应力-应变曲线^[18]

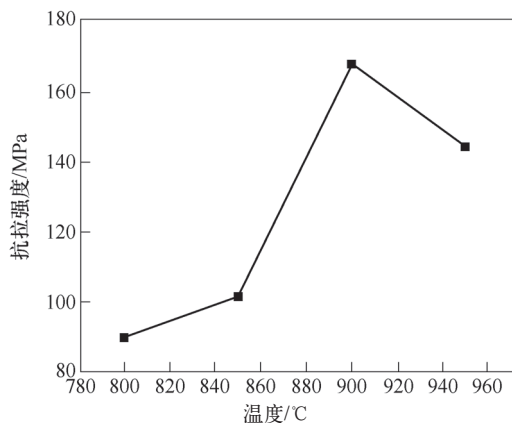


图4 界面连接强度随温度变化曲线^[18]

3.2 压强对连接接头的影响

压强是扩散连接过程中的重要参数,一般来说,压强越高,连接界面越紧密,连接接头性能越好。因为较高的压强不仅能确保接头表面的有效接触,使接触表面更容易发生原子扩散,还能激发原子状态,促使原子更迅速地穿越晶体结构,加快原子的扩散,促进界面紧密结合,使扩散连接接头力学性能达到最佳。LI等^[19]实现了Ti-33Al-3V合金与TC17合金的扩散连接,探究了扩散连接中压力对界面和原子扩散的影响。在连接过程中,TC17合金的塑性变形随压力的增加而增加,而Ti-33Al-3V合金的塑性变形很少。界面区宽度随压力的变化线性递增。Ti和Al原子的扩散距离随着压力的增加而增加。压力的增加促进了孔洞的收缩,导致孔洞的数量和尺寸减小,结合率增加,界面结合更紧密。

压强还能调整连接接头的晶体结构和组织。通过增大压强,可以促进晶界再结晶和晶粒长大,

改善晶体内部的结构,提高连接的强度和稳定性。VENUGOPAL等^[20]探究了连接工艺参数对AA5083合金扩散接头组织和力学性能的影响,发现接头强度和剪切强度随着压力的升高而增加。同时,增加压力改变了晶粒结构,较高压强降低了再结晶温度促进晶界再结晶和晶粒长大,从而增强原子扩散,提高晶体的整体性能和连接接头的强度。

压强在扩散连接中是一个重要参数,但压强并不是越高越好。压强应取决于具体的应用和材料。压强的选择应该基于具体的情况,并且需要进行试验和测试来确定最佳的压力条件。杨震等^[21]对高温钛合金Ti65板材的扩散连接进行了研究,在不同温度、不同压力下进行了扩散连接试验,通过焊合率判断扩散连接界面结合紧密情况。当压力为1MPa时,界面结合处存在孔洞,呈现为不连续线条(见图5a),未连接区域较多,焊合率为69%(见图6)。当压力为2MPa时,扩散连接界面处出现晶界,但仍有少量未结合区域,孔洞减少(见图5b),焊合率为82%。当压力增至4MPa时,界面处空洞数量、尺度变小,焊合率升至88%,接头处金相组织如图5c所示。压强对扩散连接界面具有重要影响,随着压强的增加,焊合率逐步提高,焊合率越高,压强对焊合率增强效果越缓慢,最终焊合率接近100%。图7所示为不同压力下扩散连接接头的剪切曲线,在940℃、1MPa下,连接接头剪切强度为226.8MPa,当压力增加至2MPa,接头剪切强度提高至335.3MPa,随着压力的增加,剪切强度不再发生变化,2MPa为扩散连接的最佳压强。

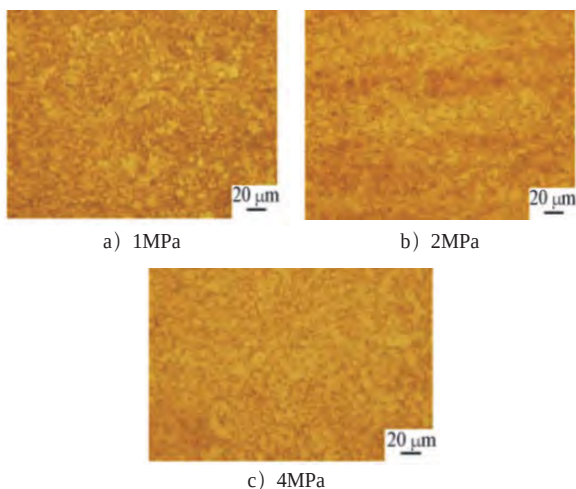


图5 不同压力下焊缝区金相组织^[21]

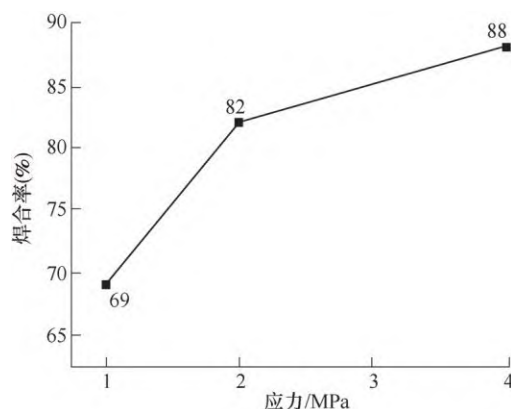


图6 焊合率曲线^[21]

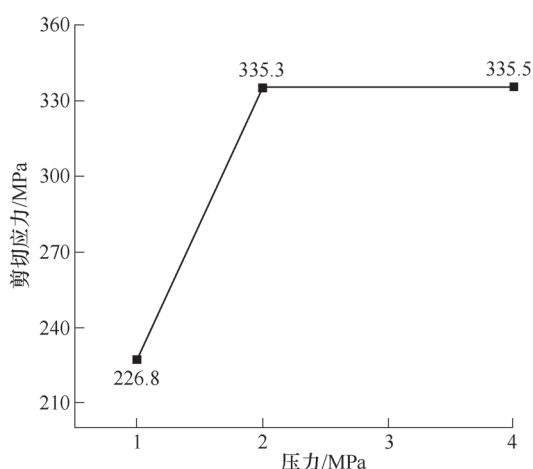
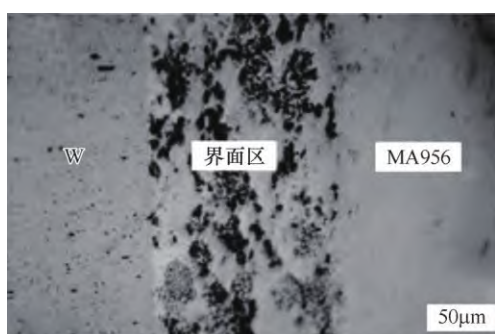


图7 剪切性能曲线^[21]

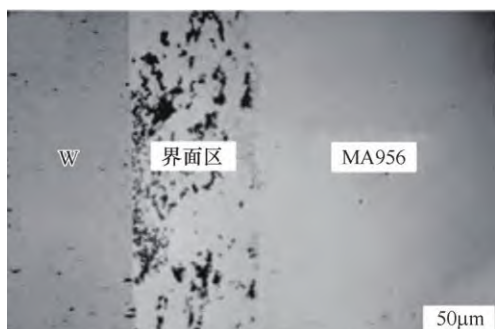
3.3 保温时间对连接接头的影响

保温时间同样在扩散连接中具有重要性,它是影响连接质量和性能的关键参数之一。当保温时间足够长时,可以确保扩散过程充分完成,减少界面缺陷和气体孔隙的形成,从而获得均匀、可靠的连接。崔翰林等^[22]探究了保温时间对W/MA956钢扩散连接的影响,采用V-Ni复合粉末为中间层,当压力为30MPa、温度为1050℃时,在保温时间10min、20min、30min条件下进行扩散连接。图8所示为不同保温时间下W/40Ni-V/MA956钢扩散连接接头的金相组织。在保温时间为10min时,观察到中间层存在大量孔洞,厚度较大,无明显扩散层;在保温时间为20min时,中间层厚度变小,孔隙和裂纹较少,致密性高;在保温时间为30min时,可观察到明显的扩散层,中间层存在少量的孔隙。随着保温时间的增加,原子扩散的数量也在增加,中间层中的V-Ni向基体扩散的数量增加,中间层厚度降低。测得不同保温时间下的接头平均剪切强度,

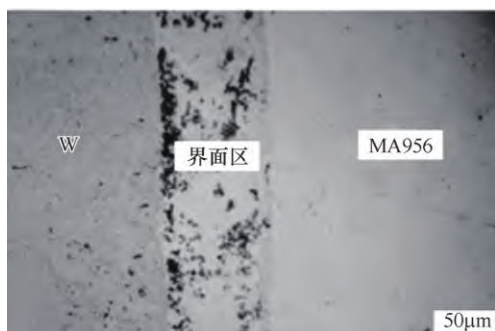
如图9a所示。保温10min时,接头平均剪切强度为179MPa;保温20min时,原子扩散数量增加,接头强度增加至225MPa;保温30min时,由于中间层中V与基体中C形成了脆性碳化物,接头强度反而降低到190MPa,因此,20min是最佳保温时间。图9b所示为保温20min时扩散连接接头的显微硬度分布。由图9b可知,扩散连接接头的最高硬度为550HV,在中间层附近。根据V-Ni二元相图可知,在中间层附近V和Ni生成了Ni₃V、NiV₂、NiV₃等脆性相,硬度提高。



a) 保温10min



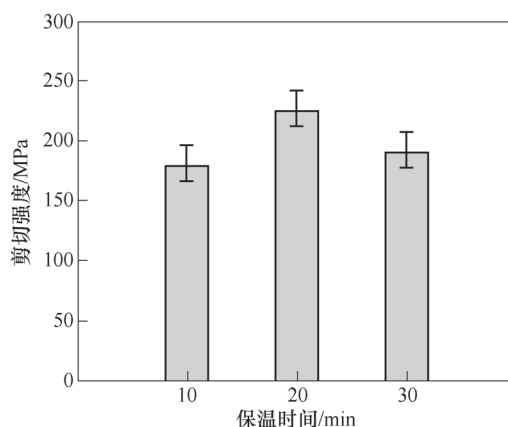
b) 保温20min



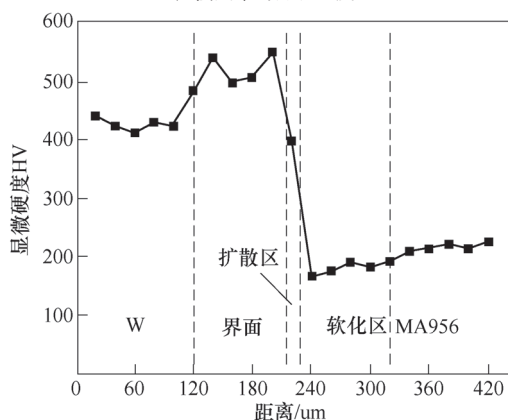
c) 保温30min

图8 不同保温时间W/40Ni-V/MA956接头金相组织^[22]

适当的保温时间有助于原子在连接接头的金属材料之间进行更为充分的扩散,促使金属间反应更彻底,有助于形成均匀、稳定的连接界面。LI等^[23]



a) 接头平均剪切强度



b) 接头显微硬度

图9 W/40Ni-V/MA956钢接头力学性能^[22]

研究了保温时间对WC-Co-Ni/不锈钢复合材料界面组织及元素扩散的影响,保温时间(60~120min)对复合材料的微观结构和力学性能有很大影响。当保温时间超过90min时,界面结合层在1300℃的烧结温度下形成。随着保温时间的增加,合金元素Fe、Co、Ni和Cr的相互扩散深度增加,而W元素的相互扩散不明显。在60~120min的保温时间内,保温90min时复合材料界面的缺陷最少。随着保温时间的延长,复合材料的孔隙率和磨损量降低,显微硬度增加。

保温时间的选择直接关系到连接的质量。过短的保温时间导致连接界面反应不充分,形成不牢固的接头。过长的保温时间会引起晶粒过度生长,影响接头的强度并造成能源的浪费。因此,应该根据具体的扩散连接工艺来选择保温时间。CHEN等^[24]研究了保温时间对工业纯钛与中碳钢真空扩散连接接头组织和性能的影响,扩散连接过程在850℃、5MPa下进行,连接时间为1h、2h、3h和4h。随着

连接时间的延长,原子运动提供能量增加,从而加速扩散连接的过程,因此,连接界面在1h和2h的连接时间内未能完全连接。当连接时间为3h时,界面完全连接,然后随着连接时间的增加,结合界面变宽。连接接头的抗拉强度先升高后降低,在3h时,抗拉强度达到最大值。随着连接时间的增加,基体晶粒变大,中碳钢基体和工业纯钛的硬度降低。连接时间分别为3h和4h时,测试了连接界面的硬度,分别为450HV和350HV。这是因为金属间化合物本来可以帮助提高硬度,但随着保温时间的增长,金属间化合物的晶粒长大,使增强硬度的效果减弱。

4 元素扩散对连接接头组织的影响

元素对扩散连接接头具有重要影响,焊件中元素浓度不同,会导致原子在化学浓度梯度下发生扩散现象。除此之外,元素扩散是金属间反应的基础。在扩散连接中,相邻金属表面上的元素通过扩散相互混合,形成金属间化合物。这些金属间化合物的形成直接影响连接接头的组织结构和性能。冯广杰等^[25]对Ti₂AlNb合金与TC4合金的扩散连接进行了研究。图10所示为在10MPa、950℃、30min下的Ti₂AlNb/TC4接头的典型微观结构。SEM背散射电子(BSE)图像显示Ti₂AlNb合金与TC4合金结合良好。在界面处形成了3个不同区域,扩散区I是灰色大块B2/β相(标记为A),扩散区II是连续的深灰色α₂相(标记为B),扩散区III包含灰色矩阵B2/β相(标记为C)和深灰色颗粒α₂相(标记为D)。ZHAO等^[26]提出了Ni和V是β-稳定元素, HUANG等^[27]提出了Al是α-稳定元素。在扩散连接过程中, Nb和Al原子从Ti₂AlNb基扩散到TC4基。Nb原子聚集在TC4基的初级β相中,促进了I区B2/β相的形成。Al

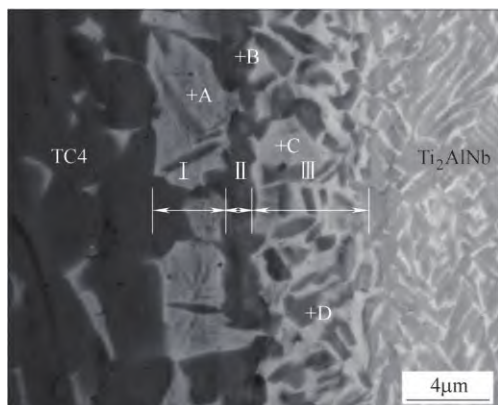


图10 Ti₂AlNb/TC4接头的典型微观结构^[25]

原子聚集在初级α相中,形成深灰色的α₂层。

元素扩散不仅发生在晶体内部,还可以发生在晶界。晶界扩散会影响晶界的组成,可能导致晶界的元素偏析或者产生固溶体,影响接头的强度和稳定性。张长日等^[28]为实现大断面铝合金无痕构筑,对铝合金扩散连接在不同温度下的界面组织进行了充分的研究和试验,温度为530℃、540℃、550℃、560℃时,压力为5MPa,保温时间为3h。图11所示为不同温度下扩散连接界面的聚焦离子束(FIB)形貌。由图11可知,随着温度升高,界面处溶解到基体中的第二相越来越多,界面处夹杂物、孔洞变少。这是由于在压力作用下,部分凸起的氧化膜破碎,Al原子相互扩散。在560℃时界面完全愈合,晶界处的第二相完全溶解到基体中,在界面处产生共晶液相消耗富集的Cu、Mg。共晶液相将氧化物颗粒带进了两侧基体中,边缘的共晶液相带着难溶颗粒被挤出,剩余共晶液相在凝固时将空洞缺陷填充,使界面完全愈合。

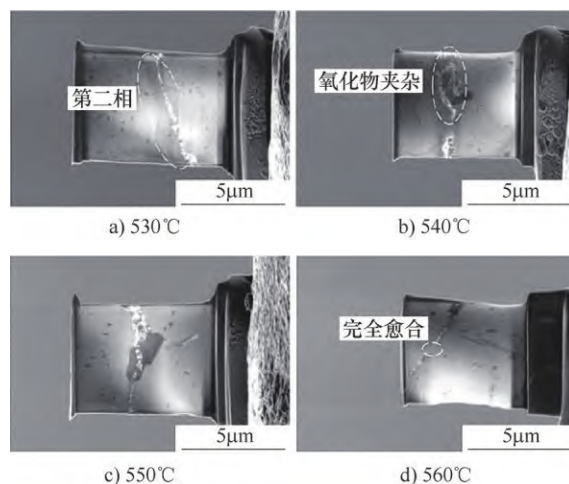


图11 不同温度下扩散连接界面的FIB形貌^[28]

5 界面结合强度与断裂机理

扩散连接的界面强度与断裂机理之间存在着密切的关系,界面结构对于断裂机理有重要影响。因此,本部分将对界面结合强度与断裂机制进行讨论和综述。

界面结合强度可以调控材料的断裂机理。在一些情况下,通过改变界面结合强度,可以引导断裂路径,控制裂纹的扩展方向。这对于提高材料的韧性和耐疲劳性能具有重要作用。高云鹏等^[29]研究了TC11钛合金扩散连接接头的断裂形貌和机理。图12

所示为TC11合金扩散连接接头疲劳断口形貌。图12a、c、e为接头低倍下断口形貌，断口包括3个区域：疲劳裂纹萌生区（A）、疲劳裂纹扩展区（B）以及最终的瞬断区（C）。裂纹起源于光滑小平面，如图12b、d、f。小平面对加载轴接近90°，裂纹萌生于界面处。由于界面两侧母材晶体取向差，因此使断裂均发生在界面处。

元素扩散可能导致晶体结构的改变，如晶界扩

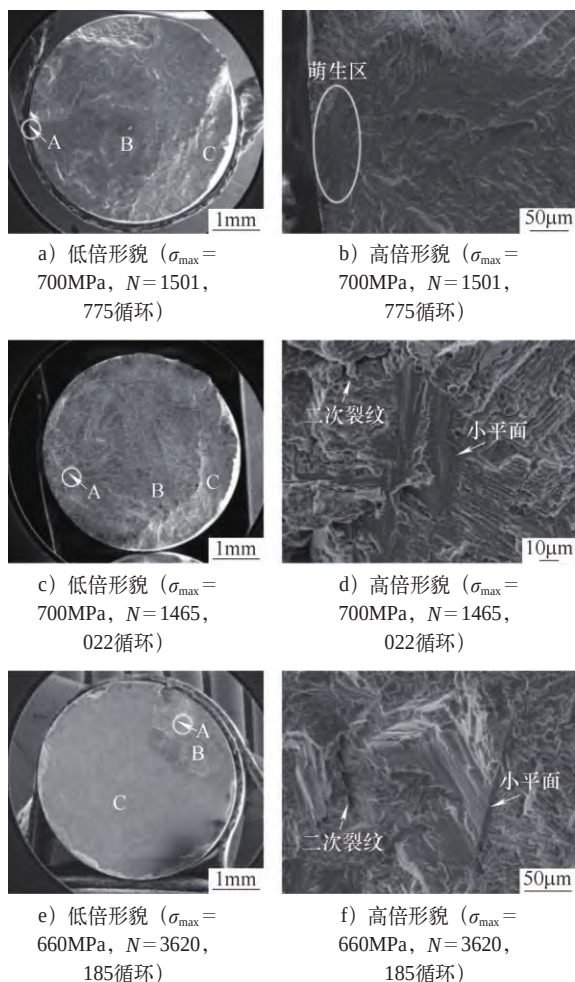


图12 TC11合金扩散连接接头疲劳断口形貌^[29]

散、晶界再结晶等。这些改变可能影响晶体内的应力分布和断裂行为，从而影响界面结合强度和断裂机理。徐芳菲等^[30]研究了不同温度下304不锈钢接头的断裂形貌。接头的断裂位置在界面处和基材附近呈现不同。如图13所示，在925℃时接头断口处可观察到未焊合区域（见图13a白色箭头）。当温度升高时，晶界迁移、孔洞减小，韧窝中不存在未焊合区域（见图13c、e、g）。975℃、1000℃下得到了粗大、不均匀组织（见图13e、g），韧窝大小不均

匀，个别韧窝直径是周围韧窝的两倍。剪切试验末期与剪切试验初期韧窝形状有所不同（见图13b、d、f、h），韧窝呈现幼圆形、抛物线形，其变形与应力集中有关。随着温度的升高，断裂方式也由韧性断裂转为脆性断裂（见图13h）。

界面结合强度的不同会影响裂纹在材料中的

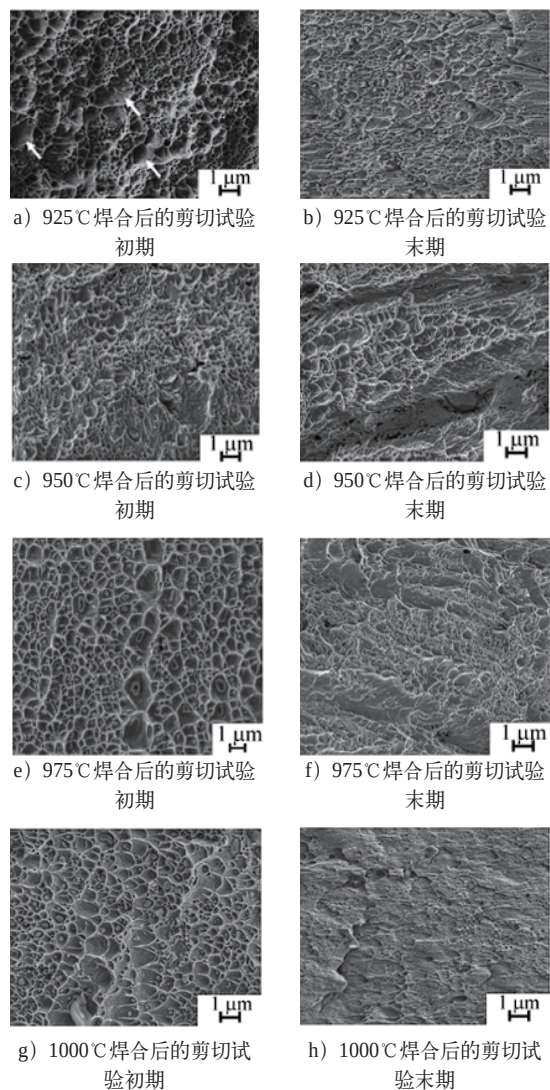


图13 不同连接温度下304不锈钢焊接接头剪切断口形貌 (30 MPa, 60 min)^[30]

路径选择及裂纹的扩展行为。弱的界面结合可能导致裂纹沿着界面迅速扩展，而强的界面结合则可能导致裂纹路径发生改变，延缓裂纹扩展。王亮军等^[31]研究了不同保温时间下TiAlNbV/TC4合金扩散连接接头断裂形态。图14所示为不同保温时间的断裂形态比较。由图14可知，保温时间为1h时，TC4合金侧可观察到较多的凹坑和麻点，此时接头强度较低，性能较差，为脆性断裂。随着保温时间

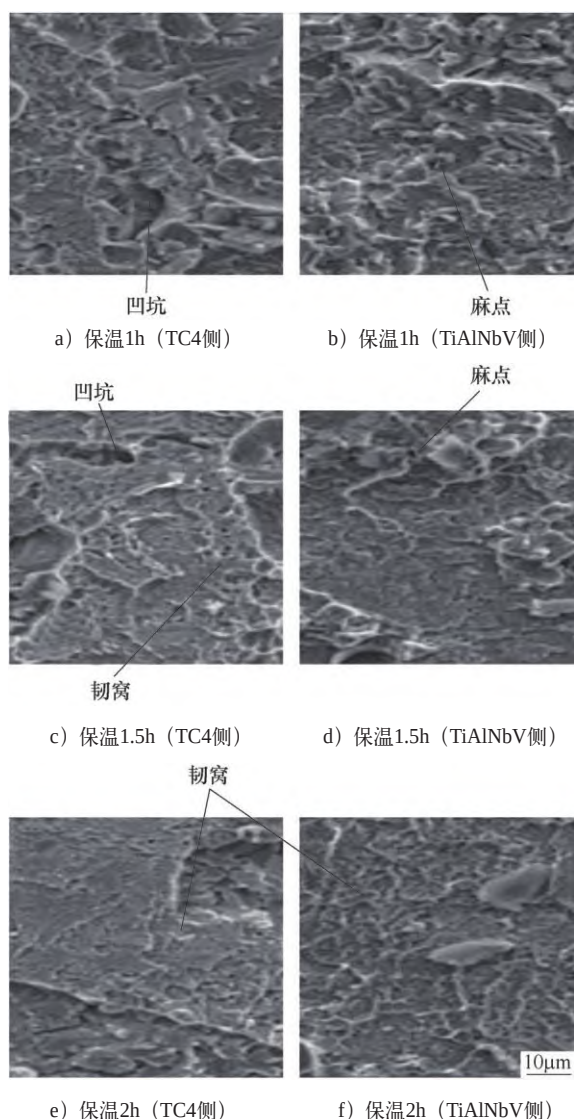


图14 不同保温时间下接头剪切断面SEM形貌^[31]

增加,在1.5h和2h时,凹坑和麻点数量减少,界面处分布不均匀的韧窝,说明界面处合金元素扩散充分,结合界面紧密,性能较好,属于韧性断裂。

6 扩散连接的应用

扩散连接技术作为金属材料加工领域的一项关键技术,在现代工业中得到了广泛应用。它通过高温下使两个或多个金属材料的原子扩散,实现了牢固的连接,为许多应用领域带来了诸多优势。尽管扩散连接可以应用于航空航天、核能、船舶与海洋工程、电子器件及汽车制造等诸多领域,但鉴于材料的特性,近年来在航空航天、核能领域应用最为广泛。

6.1 扩散连接在航空航天领域的应用

航空航天领域的工作环境对材料的要求极为苛

刻,因此选择适当的连接技术至关重要。航空航天领域中许多部件需要在高温环境下工作,例如发动机、燃烧室等^[32]。扩散连接的耐高温性使其成为连接这些部件的理想选择。飞行器^[33]在飞行过程中会受到复杂的振动和载荷,需要连接部件具有稳固的强度,扩散连接的高强度和稳定性使其在此类环境中表现出色。此外,还经常需要连接不同种类的材料,扩散连接的适应性使其能够连接各种材料,提高了设计的灵活性。

钛合金具有高比强度、高比刚度的特性,相对于许多其他金属而言,其强度很高而密度相对较低。这使得它成为航空航天结构材料的理想选择,能够减轻飞行器的质量^[34]。钛合金表现出很高的耐腐蚀性,这使得它在极端环境和复杂气候条件下的应用优势变得非常突出^[35]。最重要的是钛合金在高温环境下保持稳定性,并且具有良好的高温强度。这使得它在航空发动机等高温工作环境中得到广泛应用。在航空航天领域Ti-5Al-2.5Sn (TA15)、Ti-6Al-4V (TC4) 钛合金的扩散连接工艺备受青睐。

TA15合金因其优异的综合力学性能和焊接性能而成为航空航天领域应用最广泛的近 α 钛合金之一^[36]。

XU等^[37]通过扩散连接技术成功地制备出新型网络结构的TiBw/TA15复合材料。连接接头在2MPa、950℃、80min的条件下,获得了最高达785MPa的剪切强度,不仅提高了接头的强度,还打破了TA15合金使用温度一般低于600℃的局限性,提高了TA15合金的使用温度。使其在航空航天领域扮演着更重要的角色,用于制造飞机隔框、壁板等关键部件,以满足高温、高强度等需求。

TA15钛合金还用于制造航空发动机的关键零件。LI等^[38]在900℃、8MPa、1h的参数下实现了TA15/TC4合金的固体界面接触,平均晶粒尺寸约为2 μ m的等轴 α 晶粒和晶间 β 晶粒。层合板良好的连接接头和等轴组织保证了997MPa的极限抗拉强度和18.6%的总伸长率及良好的疲劳性能,提高了航空发动机的使用寿命。

TC4属于 $\alpha + \beta$ 相钛合金,其中 α 相是一种六角密堆积结构,而 β 相是体心立方结构。这种相结构赋予了TC4合金良好的力学性能^[39]。TC4合金具有优异的强度和硬度。其抗拉强度通常在800~1000MPa,

屈服强度在700~900MPa,具有良好的延展性和韧性,TC4主要用于制造飞机结构中的各种梁、隔框、滑轨及起落架梁,航空发动机的风扇、压气机盘、叶片^[40, 41]。王国峰等^[42]以Ni-Co纳米镀层为中间层进行了TC4合金的扩散连接,获得了剪切前度为543.4MPa的连接接头,比不添加中间层的扩散连接剪切强度提升了61.4%。当扩散连接的工艺参数为800℃、3MPa、1h时,中间层厚度为2.5μm,对界面处原子扩散促进作用最佳。TC4的扩散连接将有助于提高飞机性能、减少燃料消耗,并增加飞机的寿命。

Ti₂AlNb合金具有较高的比强度、抗氧化性和优异的抗蠕变性能,使用其代替传统高温合金可以降低发动机和运载工具本身的质量,提高发动机的比推力和效率。LIN等^[43]在950℃、15MPa、100min参数下实现了Ti-6Al-4V和Ti-22Al-25Nb的扩散连接,得到了强度达894MPa的连接接头,与Ti-22Al-25Nb基合金的抗拉强度几乎相同,同时克服了Ti₂AlNb合金可加工性差等缺点。Ti₂AlNb合金和TC4合金的可靠连接可以得到综合优势的复合结构,更好应用于飞机的制造中,降低飞机的总重量,提高燃油效率。

6.2 扩散连接在核能领域的应用

核能领域作为能源产业的重要组成部分,其设备和组件在高温、高压、高辐射等多种极端条件下工作,对连接技术提出了极高的要求^[1]。在这特殊的工作环境下,扩散连接技术表现出色,确保了连接的牢固性和长期的稳定性,因而成为核能领域理想的连接解决方案。扩散连接适用于复杂形状和不同材料之间的连接,而在核能设备中,由于涉及到多种材料和复杂结构,所以扩散连接技术通过高温下实现材料原子的扩散,确保了连接的均匀性和密封性,可有效防止辐射和物质泄漏^[44]。此外,扩散连接在核反应堆内部的高温环境下能够保证连接的稳定性,连接界面能够在辐射环境中保持结构稳定,不易受到辐射的损伤。扩散连接提供的高强度连接,使核能设备能够承受在运行中产生的各种应力和压力。

钨合金以其独特的物理和化学性质在核能领域中成为理想的材料之一^[45],具有高达3422℃的熔点,使其能够在核反应堆的高温环境中保持稳定。

由于钨是一种高密度金属,拥有较大的原子质量,因此可用于吸收中子,提高反应效率,同时也有助于设计更紧凑、高效的核能装置。钨合金表现出出色的辐射抗性,能够在高辐射环境中维持稳定性。在高温环境下,钨合金依然保持较高的强度,能够承受核反应堆中的各种压力。其优异的导热性能能够更有效地分散产生的热量。此外,钨合金还具备优越的耐蚀性,可确保设备在恶劣环境中长期可靠运行^[46]。这些特性使得钨合金成为核能领域中制造关键部件的首选材料之一。

高熔点、良好的耐蚀性和耐辐射性使钨成为聚变反应堆第一壁的合适材料,但钨作为结构材料,应用受到其脆性、室温韧性低和成本高的限制,将钨与其他结构材料特别是钢结合是解决这一问题的有效方法。QI^[47]采用等摩尔FeCoCrNi高熵合金为中间层连接W和低活化马氏体钢(CLAM),获得了最高剪切强度为(224±6)MPa的接头。

虽然钨具有高温高强和优异的耐蚀性,但由于密度过高,钨及其合金构件的应用受到了限制,钢的高强度、可塑性、焊接性和低成本可以解除这一限制。SUN等^[48]为了实现钨合金(90W-7Ni-3Cu)与304不锈钢(304SS)的高性能扩散连接,采用Cu为中间层,在900℃、20MPa、2h参数下实现了W/Cu/304SS和Cu/304SS界面良好的冶金结合,在W/Cu/304SS界面上没有形成金属间化合物或其他脆性相,接头的抗拉强度为265MPa,比相同连接条件下没有Cu夹层接头的抗拉强度(168MPa)高出约58%。这种高强度的连接使钨合金/钢复合结构在穿甲弹芯这种极端环境下得到越来越多的应用。

钨被用作核聚变研究中等离子体的壁材料,低活化铁素体/马氏体(RAFM)钢具有良好的热物理和力学性能,对辐射引起的膨胀的敏感性低,以及在中子辐照下抗氢脆化。在核聚变中,钨钢和RAFM钢之间实现可靠的冶金结合,可用于制造具有高热和力学性能的等离子体表面部件,作为聚变装置的关键第一壁和偏滤器。为了实现钨与RAFM钢的有效连接,可采用分步连接的方式,先连接W/W-Fe,再连接W-Fe与RAFM。韩勇等^[49]研究了钨和钨合金的扩散连接,以Fe粉为中间层,对W与W-60Fe合金采用真空扩散连接。成功解决了W与RAFM连接中关键的第一步。HUANG等^[50]在980℃

和150MPa下热等静压1h,将中间层Fe与钨和RAFM钢成功实现了扩散连接。在W/Fe界面上形成了 Fe_2W 型和 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 型两个富Fe相。两相在界面热应力下协同变形,使W/Fe/RAFM-钢接头表现出较高的结合强度和良好的延展性。

扩散连接技术在核能领域的应用不仅展现了其技术上的优越性,也为核能产业的发展和设备的安全运行提供了重要的技术支持。

7 结束语

传统扩散连接技术在金属材料加工领域表现出独特优势,在研究及应用上呈现出极大的潜力和广阔的前景,为金属工程领域带来了新的思路和方法。通过对工艺参数的优化,能够实现对金属连接更为精细的调控,满足不同工业领域对金属构件多样化的需求。对元素扩散动力学的深入研究有助于加速扩散过程,提高生产效率,为工程实践提供更高效率的金属加工解决方案。深刻理解断裂机理,能够制定更为有效的改进策略,确保金属构件连接的可持续性。扩散连接技术在航空航天、核能等领域的应用,展示了在实际工程中的广泛适用性。传统扩散连接技术在这些领域中发挥着关键的作用,为高温、高强度等极端工作环境下的金属构件提供了可靠的连接方案。通过深入了解其原理和优势,有望推动金属材料加工技术的不断创新,为工业生产和科技发展贡献更多的可能性。期望在未来的研究和实践中,传统扩散连接技术能够继续发挥其独特的优势,为金属材料领域的进步和创新提供可靠的支持。

参考文献:

[1] SARANAM V R, PAUL B K. Feasibility of using diffusion bonding for producing hybrid printed circuit heat exchangers for nuclear energy applications[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 26: 560-569.

[2] KUMAR R R, GUPTA R K, SARKAR A, et al. Vacuum diffusion bonding of α -titanium alloy to stainless steel for aerospace applications: Interfacial microstructure and mechanical characteristics[J]. Materials Characterization, 2022, 183: 111607.

[3] ZHAO P, LI Z, XIA Y, et al. Ultrasonic-assisted liquid phase diffusion bonding of Al alloys under low temperature and pressure for high-temperature

resistance applications[J]. Materials & Design, 2023, 225: 111544.

- [4] GAO H, HE G, LI Q, et al. Diffusion bonding of high entropy alloy and stainless steel at a relative lower temperature via surface nano-crystallization treatment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 475-487.
- [5] XU X, KANG Q, WANG G, et al. Evaluation of electrically-assisted vacuum diffusion bonding of a TiBw/TA15 composite by microstructural analysis and mechanical testing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 1115-1128.
- [6] KUMAR R R, GUPTA R K, SADHASIVAM M, et al. Mechanical behaviour and interface correlative microscopic analysis of vacuum diffusion bonded dissimilar stainless steel/ α -Ti alloy joint for aerospace applications[J]. Vacuum, 2023, 217: 112561.
- [7] WANG M, HU J, ZHU J, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V cruciform structure fabricated by coaxial electron beam wire-feed additive manufacturing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 960: 170943.
- [8] YUJI T, TASHIRO S, KINOSHITA H, et al. An investigation on plasma-MIG hybrid welding process of thick plate aluminum[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2024, 9: 100188.
- [9] LI P, LI J, XIONG J, et al. Diffusion bonding titanium to stainless steel using Nb/Cu/Ni multi-interlayer[J]. Materials Characterization, 2012, 68: 82-87.
- [10] DU Z, WANG C, LIU Q, et al. The superplastic forming/diffusion bonding of TA7 titanium alloy for manufacturing hollow structure with stiffeners[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 385-394.
- [11] ZHANG Y C, JIANG W, TU S T, et al. Creep strength and toughness synergistic strengthening mechanism investigation of the Inconel625/BNi-2 brazed joint[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 2602-2611.
- [12] 张洪雨. TU1铜-304不锈钢换热器真空扩散连接技

- 术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [13] 李炳南. 45钢与增材制造316L不锈钢扩散连接接头组织与力学性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [14] SHI J, LIU J, JIN F, et al. Diffusion bonding of FGH98 superalloy and DD5 single crystal using pure Ni interlayer[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 37: 107003.
- [15] ZENG S, YOU G, YAO F, et al. Effect of bonding temperature on the microstructure and mechanical properties of the diffusion-bonded joints of Zr705 alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 804: 140782.
- [16] WANG Z, YANG X, WANG J, et al. Microstructure and mechanical properties of vacuum diffusion bonded Zr-4 alloy joint[J]. *Crystals*, 2021, 11 (11): 1437.
- [17] LIN T, LI C, CHEN Y, et al. Role of nanostructured Ni surface layer in enhanced Hastelloy alloy diffusion bonding at temperatures far beyond recrystallization[J]. *Scripta Materialia*, 2024, 239: 115826.
- [18] 孙怀, 韩勇, 范景莲. 钨合金/不锈钢的低温扩散连接及界面组织性能[J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2023, 54 (4): 1263-1271.
- [19] LI H, YANG C, SUN L, et al. Influence of pressure on interfacial microstructure evolution and atomic diffusion in the hot-press bonding of Ti-33Al-3V to TC17[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 720: 131-138.
- [20] VENUGOPAL S, SEEMAN M, SEETHARAMAN R, et al. The effect of bonding process parameters on the microstructure and mechanical properties of AA5083 diffusion-bonded joints[J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2022, 5 (4): 555-563.
- [21] 杨震, 张晓巍, 张鑫, 等. 工艺参数对高温钛合金 Ti65扩散连接性能的影响[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43 (12): 254-258.
- [22] 崔翰林, 李先芬, 滕鹏, 等. 保温时间对以V-Ni复合粉末为中间层的钨/MA956钢扩散连接的影响[J]. *金属功能材料*, 2022, 29 (1): 28-32, 39.
- [23] LI H, ZHANG H, LI G, et al. Effects of holding time on interface microstructure and element diffusion of WC-Co-Ni/stainless steel composites[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, 108: 105951.
- [24] CHEN X, XIAO H, SHI Y, et al. The influence of bonding time on microstructure and mechanical properties of vacuum diffusion bonded joints between commercial pure titanium and medium carbon steel[J]. *Vacuum*, 2023, 214: 112158.
- [25] 冯广杰, 魏岩, 胡丙旭, 等. Ti₂AlNb合金与TC4合金真空扩散连接 (英文) [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31 (9): 2677-2686.
- [26] ZHAO Y Q, XIN S W, ZENG W D. Effect of major alloying elements on microstructure and mechanical properties of a highly β stabilized titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 481 (1): 190-194.
- [27] HUANG S, ZHANG J, MA Y, et al. Influence of thermal treatment on element partitioning in $\alpha + \beta$ titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 791: 575-585.
- [28] 张长日, 孟令刚, 徐大召, 等. 温度对2A12铝合金扩散连接中的界面愈合与性能影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42 (7): 875-880.
- [29] 高云鹏, 王颖, 王东坡, 等. TC11钛合金扩散连接接头组织及力学性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52 (2): 770-776.
- [30] 徐芳菲, 王斌, 梁滨, 等. 扩散连接温度对304不锈钢接头性能与组织的影响[J]. *模具技术*, 2021 (2): 1-7.
- [31] 王亮军, 赵跃文. TiAlNbV/TC4扩散连接接头界面组织及力学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47 (19): 210-212.
- [32] LI M, WANG Z, XU R, et al. Advances in plasma-assisted ignition and combustion for combustors of aerospace engines[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 117: 106952.
- [33] WANG L, SONG B, SUN Z, et al. Review on ultra-lightweight flapping-wing nano air vehicles: Artificial muscles, flight control mechanism, and biomimetic wings[J]. *Chinese Journal of*

- Aeronautics, 2023, 36 (6) : 63-91.
- [34] MAO X, DONG L, ZHANG Y, et al. Superior strength-ductility combination in TiC/TC4 composites via In situ construction Ti₂Cu nanoparticles[J]. Carbon, 2024, 219: 118805.
- [35] YUAN J. Markedly improved tensile property and corrosion resistance of ZTC4 titanium alloy by hot pressing[J]. Materials Letters, 2024.
- [36] LI Y, WU A, LI Q, et al. Mechanism of reheat cracking in electron beam welded Ti₂AlNb alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29 (9) : 1873-1881.
- [37] XU X, YANG D, ZHANG K, et al. Effect of the TiB reinforcement phase on the vacuum diffusion bonding of TA15 alloy: Interfacial microstructure and mechanical properties[J]. Materials Characterization, 2023, 204: 113182.
- [38] LI T, WU H, WANG B, et al. Fatigue crack growth behavior of TA15/TC4 dissimilar laminates fabricated by diffusion bonding[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 156: 106646.
- [39] ZHANG H, LI J, MA P, et al. Study on microstructure and impact toughness of TC4 titanium alloy diffusion bonding joint[J]. Vacuum, 2018, 152: 272-277.
- [40] VENKATESWARLU V. Failure analysis and optimization of thermo-mechanical process parameters of titanium alloy (Ti-6Al-4V) fasteners for aerospace applications[J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2013, 1 (2) : 49-60.
- [41] TAO J, HU S, JI L. Effect of trace solute hydrogen on the fatigue life of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 684: 542-551.
- [42] 王国峰, 刘永康, 刘青, 等. Ni-Co纳米镀层为中间层的TC4钛合金低温扩散连接[J]. 锻压技术, 2022, 47 (11) : 239-245.
- [43] LIN P, XI X, ZHAO W, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V/Ti-22Al-25Nb joint formed by diffusion bonding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (5) : 1339-1349.
- [44] XU D, CHENG J, CHEN P, et al. Recent progress in research on bonding technologies of W/Cu monoblocks as the divertor for nuclear fusion reactors[J]. Nuclear Materials and Energy, 2023, 36: 101482.
- [45] OONO N, NOH S, IWATA N, et al. Microstructures of brazed and solid-state diffusion bonded joints of tungsten with oxide dispersion strengthened steel[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 417 (1-3) : 253256.
- [46] YANG Z, ZHANG X, CHENG J, et al. Effect of bonding process on the microstructures and strength of W/steel joints with a W-Cu-Ni interlayer[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2022, 106: 105846.
- [47] QI Q. Benefits of high entropy alloy interlayer in the vacuum diffusion bonding of W-CLAM steel[J]. Vacuum, 2023, 214: 112213.
- [48] SUN H, HAN Y, LI Y. Microstructure and strength of diffusion bonding W alloy/304 stainless steel joint using a Cu interlayer[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 113: 106188.
- [49] 韩勇, 姜雪, 孙怀. 钨和钨合金真空固态压力扩散连接[J]. 中国钨业, 2021, 36 (6) : 54-61.
- [50] HUANG P, WANG Y, PENG H, et al. Diffusion bonding W and RAFM-steel with an Fe interlayer by hot isostatic pressing[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 158: 111796.

MW 20240529