

金属间化合物的固相焊接 研究现状*

Research Status of Solid-State Welding on Intermetallics

西北工业大学凝固技术国家重点实验室 索娟娣 李文亚



索娟娣

硕士研究生, 材料加工工程专业, 主要从事钛合金线性摩擦焊接头组织与性能研究, 2014年在 Materials Science and Engineering A上发表论文1篇。

随着航空航天发动机对性能要求的不断提高, 对高温结构材料的性能也提出了更高的要求, 希望材料能够更轻、更强, 有更高的抗腐蚀和耐

近年来, 在工程中受到大量关注的金属间化合物主要是 Ni-Al 系、Ti-Al 系及 Fe-Al 系的 A_3B 和 AB 型金属间化合物。然而在实际工程应用中, 该类合金的焊接方法还存在很大的问题与挑战, 目前国内外关于 3 类金属间化合物的焊接研究已有较多相关报道。本文主要综述了最常用的 TiAl 系及 FeAl 系金属间化合物的固相焊接技术, 包括扩散焊和摩擦焊接。

高温性能^[1]。金属间化合物具有长程有序的超点阵结构, 晶体中金属键和共价键共存, 故同时具有金属的韧性及陶瓷的高温性能, 是最具有发展潜力的新一代航空航天发动机用高温结构材料^[2]。近年来, 在工程中受到大量关注的金属间化合物主要是 Ni-Al 系、Ti-Al 系及 Fe-Al 系的 A_3B 和 AB 型金属间化合物。然而在实际工程应用中, 该类合金的焊接方法还存在很大的问题与挑战, 目前国内外关于 3 类金属间化合物的焊接研究已有较多相关报道。本文主要综述了最常用的 TiAl 系及 FeAl 系金属间化合物的固相焊接技术, 包括扩散焊和摩擦焊接。

TiAl 金属间化合物固相焊接技术

与其他金属间化合物相比, Ti-Al 系金属间化合物具有密度低、比强度高、弹性模量高以及优异的抗氧化性和耐腐蚀性等, 从而成为航空航天工业中很有前途的结构材料。目前正在广泛研究和开发的 Ti-Al 系金属间化合物主要有 3 种: Ti_3Al (α_2)、TiAl (γ) 和 $TiAl_3$ (τ)。这里主要关注的是 α_2 和 γ 钛铝合金的焊接。

TiAl 系金属间化合物与镍基高温合金相比可使质量减轻 40%, 在新一代航空航天发动机结构中具有广

* 国家自然科学基金(51005180), 霍英东教育基金会高等院校青年教师基金(131052), 西北工业大学基础研究基金(JC201233)资助。

泛的应用前景^[2]。美国已经将 Ti₃Al 用于制造喷气涡轮发动机的尾喷燃烧器, 但因其室温塑性差、成形困难及制造成本高等缺点, 从而限制了其广泛应用^[3-4]。解决这些问题的有效办法是加入 β 稳定元素(如 Nb、V、Mo 等)进行合金化, 其中以 Nb 的作用最为显著^[5]。通过对 TiAl 金属间化合物的深入研究, 其原先存在的室温延性低、热塑性变形能力差和 850℃ 以上抗氧化能力不足等缺陷在一定程度上得到了相应的解决。因此, TiAl 金属间化合物的工程应用范围也在不断扩大。与此同时又遇到了一个新的问题: 在工程应用中要制成构件就碰到了连接问题, 包括 TiAl 合金自身的连接及与其他材料的连接。目前已经有较多关于 Ti₃Al 基合金熔焊的报道^[6-10], 结果表明其可焊性存在 2 个较突出的问题: 焊接热裂倾向严重; 与基体相比, 接头表现出较低的力学性能。而且, 任何熔焊工艺都不可避免地引入了间隙元素, 这些间隙元素一般都具有有害作用^[11]。TiAl 金属间化合物在钎焊时, 加热、冷却速度慢, 高温停留时间长, 很难保证接头质量, 因此实际工程应用中很少采用这种连接技术。而固相焊因为没有达到母材的熔点而避免了凝固过程出现的一些缺陷, 如偏析等, 这样就为 TiAl 金属间化合物的固相连接技术奠定了基础^[12]。

1 扩散焊

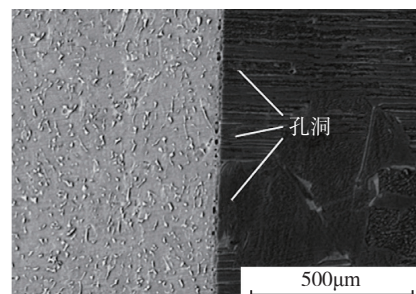
大量研究表明, 扩散焊是连接 TiAl 金属间化合物比较好的方法。与传统的连接方法相比, 扩散焊可以实现较大面积的连接, 该过程在 β 转变点以下发生, 将变形减到最低, 而且焊后几乎不需要机械加工^[13]。但是, TiAl 基合金的扩散激活能高, 塑性变形的流变应力值较大, 实现扩散焊需要的温度高、时间长^[14]。针对这个问题, Wu 和 Huang^[13]对 TiAl 金属间化合物进行激光熔凝及随后的热处理, 结果表明基体表层组织得

到细化, 扩散焊过程可以在低温短时间内完成。随后 Wu 等^[15]研究了 γ-TiAl 基合金的超塑性扩散焊接, 即在扩散焊接前利用激光表面熔凝技术和焊前预热方法对母材表面进行处理, 结果表明对材料进行这种预处理后, 扩散焊接过程会在接头形成细枝晶结构或细化的等轴晶组织, 这些组织正是低温下形成良好接头的关键, 从而减少了加工成本并降低设备的复杂性, 试验中得到的接头剪切强度甚至可以达到母材的 82%。

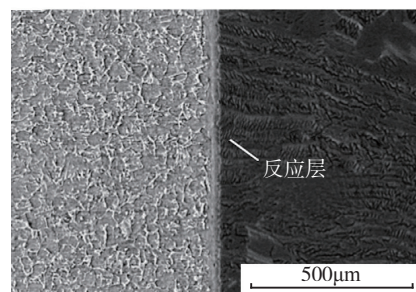
为了进一步提高接头强度和韧性, 有时会在焊接时加入中间层, 这样可以改善表面接触, 促进塑性变形和扩散过程。周媛等^[16]研究了 TiAl 合金与高温合金的扩散焊, 结果表明直接扩散焊接时, 焊缝中存在大量未焊合的孔洞, 接头室温剪切强度平均值仅有 16MPa; 加入中间层后得到了无缺陷的接头, 接头的室温剪切强度可达到 125MPa, 而且焊接温度和压力有所降低, 说明引入中间层对于扩散焊连接 TiAl 与高温合金异种材料是一种很有效的方法。He 等^[17]研究了用氢化的 Ti₆Al₄V 做中间层焊接 TiAl 基合金时, 氢原子对焊接质量的影响, 结果表明在相同焊接参数下, 孔洞随着氢质量分数的增加快速减少, 如图 1 所示, 在图 1 (b) 条件下界面孔洞完全消失并出现了新的反应层, 接头室温剪切强度可达 290MPa。同时, 高温下 Ti₆Al₄V 中的氢原子会扩散出来, 增强材料的塑性变形能力和合金元素的扩散能力, 有助于提高接头质量。

2 摩擦焊

摩擦焊是在压力作用下, 通过待焊界面的摩擦使界面及其附近温度升高, 材料断面达到热塑性状态, 伴随着材料产生塑性流变, 通过界面的分子扩散和再结晶而实现焊接的固态焊接方法。利用旋转摩擦焊和线性摩擦焊焊接的 TiAl 金属间化合物接头性能较好。在线性摩擦焊焊接



(a) 无氢



(b) 氢质量分数为 0.5%^[17]

图1 用氢化的 Ti₆Al₄V 作为中间层焊接 TiAl 基合金所得接头的显微照片
(T=850℃, P=15MPa, t=15min)

TiAl 金属间化合物方面, 英国焊接研究所的 Threadgill 贡献特别大, 并且通过改变加工参数比较了 α₂ 基和 γ 基合金的可焊性^[12]。

在焊接 TiAl 金属间化合物时, 不仅要考虑其自身的连接, 还要研究与其他材料的异质连接, 这样才能满足工程应用的要求, 使材料的性能发挥到最优。王忠平等^[18]研究了 TiAl 金属间化合物与 NiCr₂₀TiAl 的摩擦焊接过程, 该过程可以实现的主要原因是两侧材料中主要合金元素在界面发生扩散, 结果表明在摩擦焊接过程热力耦合的作用下, 界面附近均发生了动态再结晶, 形成了细晶层, 在文中的优化工艺参数下, 接头拉伸强度可以达到 390MPa 以上。谭立军等^[19]研究了 Ti₂AlNb 和 TC11 异种材料的线性摩擦焊接, 试验采用不同的焊接参数, 结果表明随着焊接工艺参数的提高, 焊接界面结合率明显提高, 在合适的条件下能达到 100% 的结合, 形成完好接头时, TC11 合金轴向缩量比 Ti₂AlNb 明

显要小,这说明在焊缝两侧热影响区 Ti₂AlNb 合金侧形变较小;而且两侧的显微硬度值变化趋势不同,如图 2 所示,这是由两种材料各自的特性决定的。Lee 等^[20]采用不同的加工参数对 TiAl/AISI4140 进行旋转摩擦焊接,接头宏观照片如图 3 所示,由于两种母材的性能不同,因此 AISI4140 侧形成了完全对称的飞边,而 TiAl 侧几乎看不到飞边,且飞边量随着摩擦力 P₁、顶锻力 P₂ 和摩擦时间 t₁ 值的增大而增加;接头分为 4 个区: TiAl 片层组织、TiC 层、再结晶铁素体和细珠光体区;对接头进行了显微硬度和拉伸性能测试, AISI4140 侧靠近焊缝硬度值明显增加,而 TiAl 侧无变化,接头拉伸强度为 120MPa,这个值低于其他连接方法,主要是因为边缘区域存在微裂纹。为了避免裂纹的存在, Lee 等^[21]又提出了用纯铜作为中间层进行焊接,此时接头没有出现裂纹,而且 AISI4140 侧热影响区也变小了,但如果想在高温下获得较好的力学性能,他们提出最好用铜合金作为中间层。

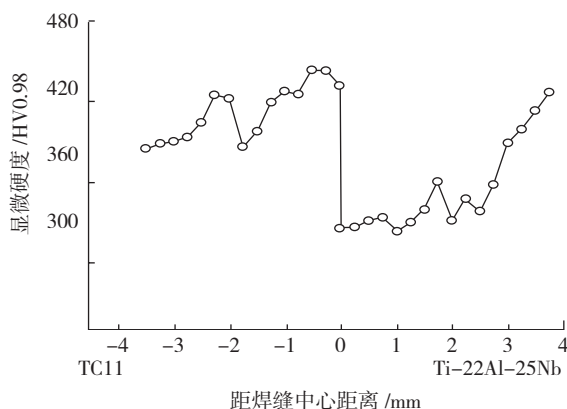


图2 接头的显微硬度分布^[19]

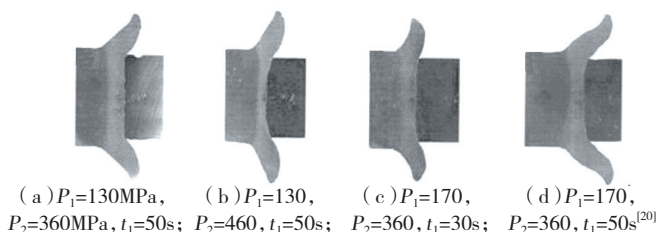


图3 不同参数下旋转摩擦焊接TiAl/AISI4140的宏观图片

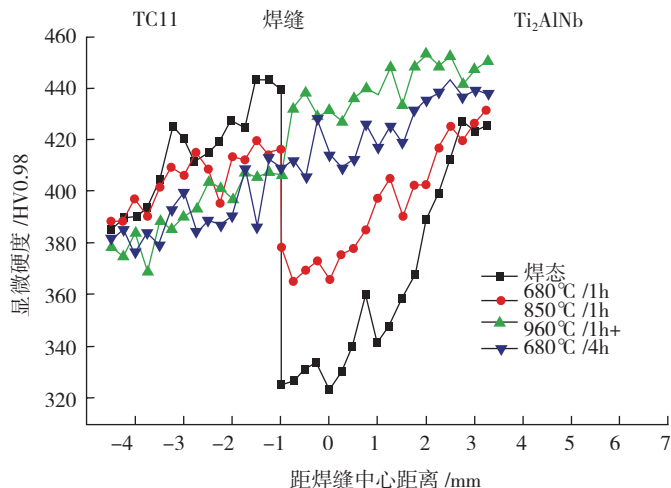


图4 Ti₂AlNb/TC11接头显微硬度分布^[22]

研究发现焊后接头处会存在残余应力,对焊件进行焊后热处理不仅可以消除残余应力,同时还可以稳定焊缝及邻近区域的组织,提高接头性能。Wu 等^[17]的研究表明进行焊后热处理,接头会发生再结晶现象而基体组织不变,且大大提高了接头质量。Tan 等^[22]通过 LFW 技术焊接了 Ti₂AlNb 和 TC11 异质接头,研究了焊后热处理对接头组织、显微硬度以及拉伸性能的影响,结果表明热处

理后接头组织均匀化,接头拉伸强度随热处理温度的升高而增大,尤其在 850℃或以上保温 1h,接头拉伸强度甚至超过了 TC11 母材,而显微硬度变化比较复杂,如图 4 所示。

FeAl 系金属间化合物的固相焊接技术

FeAl 系金属间化合物,具有优异的抗氧化性、抗腐蚀性和较高的中温强度,在硫化气氛中甚至优于不锈钢及防腐涂层,而且其成本较低(只有不锈钢的 1/3),又可以用传统的工艺手段容易地进行加工,很有可能发展成为一类中温或高温腐蚀环境中使用的新型结构材料。文献 [23-24] 提到 Fe₃Al 基合金可用于航空航天、汽车工业、能量转换系统以及过滤材料等领域,新的研究还发现它是一种很好的汽车刹车材料,且它们的抗热震性能比较好。目前,对于 Fe₃Al 基合金的研究正逐步转向应用阶段,而焊接是阻碍其推广应用的工艺,也是工程应用亟待解决的问题。

1 扩散焊

已有文献报道了 FeAl 金属间化合物自身的焊接,为了将其应用于实际工程,还得考虑其与异质材料的焊接,因为异种材料的物理化学性能差异比较大,传统的熔焊方法很难实现连接,目前采用比较广泛的是

扩散焊。王娟等^[25]的研究表明在合适的加工参数下扩散焊得到了结合良好的 Fe₃Al/Q235 接头,接头主要包括 3 个区域:界面近 Fe₃Al 区域、扩散界面和界面近 Q235 碳钢侧,其中界面处显微组织晶粒细小,大多呈等轴晶分布;显微硬度沿着 Q235 基体,越靠近界面,硬度值明显升高(470~530kg/mm²)。李亚江等^[26]采用不同的工艺参数对 Fe₃Al/18-8 异种材料进行扩散焊连接,结果表明加热温度、保温时间和压力直接影响异种材料的扩散焊界面结合状况,随着加热温度的升高,接头剪切强度先升高后减小,加热温度不变时,保温时间越长,剪切强度越高;在该试验优化参数下,接头剪切强度可达 246MPa。

前文提到在焊接过程中引入中间层有诸多好处,因此在 FeAl 基合金的焊接过程中,也开始引入中间层。Torun 等^[27]通过电镀的方法在 Fe₇₂Al₂₈ 合金接头表面电镀了厚度约为 5 μm 的铁中间层,随后进行 Fe₇₂Al₂₈ 的对焊,结果所有试样接头质量良好,接头显微硬度没有明显的变化,几乎和母材相当,在试验条件下,接头的最大剪切强度达到母材的 86% (396MPa)。

2 摩擦焊

Sketchley 等^[28]研究了 Fe₃Al-ODS 自身的焊接以及与 Haynes 230



图5 细晶颗粒Fe₃Al-ODS合金摩擦焊接头显微组织^[28]

合金的旋转摩擦焊接,结果表明连续驱动旋转摩擦焊接方法焊接 Fe₃Al-ODS 会得到高质量的接头,接头组织如图 5 所示,是细小、等轴的再结

晶颗粒,无裂纹、未焊合及其他缺陷,且母材组织对焊接没有明显的影响;在焊接 Fe₃Al-ODS 和 Haynes 230 异质接头时没有遇到困难,且接头组织也非常细小。在室温下进行拉伸试验时,试样断裂在接头区域,这是因为微观组织出现了大量不可逆的改变。Torun 等^[29]研究了焊接时间对摩擦焊铸造 Fe-28Al 合金对焊的影响,结果表明在试验所选焊接时间下得到的接头质量都很好,焊缝组织均匀细小、无气孔和裂纹等缺陷,焊接界面附近有 2 个代表性的区域:完全再结晶区和变形区;试验所得接头显微硬度和剪切强度都比母材的高。Celikyurek 等^[30]利用摩擦焊方法焊接了 Fe-28Al 合金与 316L 不锈钢,试验得到了无气孔和裂纹的良好接头,接头显微硬度高于基体组织,且当摩擦压力低时(50MPa),接头剪切强度随着时间的延长而增大,当摩擦压力较大时(100MPa),剪切强度几乎不随时间变化。

焊后热处理可以优化接头组织并提高性能,因此金属间化合物在焊接后进行热处理是很有必要的。关于 FeAl 基合金焊后热处理的文献报道较少,马海军等^[31]研究了热处理对 Fe₃Al/18-8 扩散焊接头组织及性能的影响,热处理后接头组织更加均匀,晶粒得到不同程度的细化,而显微硬度与热处理前相比有不同程度的降低,这说明热处理对提高接头的韧性有利。

结束语

可焊性方面,关于金属间化合物的焊接技术,已有很多相关的文献报道,但是,熔焊过程会产生气孔和裂纹等缺陷,接头与基体相比表现出较低的力学性能。固相焊得到的焊缝质量一般都较好,无缺陷,且可以用于异质材料的焊接,这样就可以满足结构部件不同区域对温度和性能的不同要求,充分利用材料的不同特

性,获得优异的整体性能,使金属间化合物在工程上的应用范围更加广泛。

显微组织方面,摩擦焊得到的接头一般会包含几个代表性的区域:母材区、变形区和焊缝区。变形区的组织成流线分布,主要是机械摩擦联合作用的结果;焊缝温度一般都超过了基体的再结晶温度,因此会发生再结晶,组织都是细小的等轴晶粒。扩散焊的接头主要是通过材料发生原子扩散反应形成的,接头一般包括基体和扩散界面,界面组织也是细小的等轴晶。

力学性能方面,摩擦焊焊接 FeAl-ODS 合金时,因为微观组织得到了不可逆的转变,得到的接头性能比母材差,但是焊接非氧化物弥散强化的 FeAl 基和 TiAl 基合金时,因为焊缝组织细小无缺陷,从而接头性能比母材好。扩散焊在连接金属间化合物时,接头性能不能达到母材的强度,如果加入合适的中间层,可以很大程度的提高接头强度和韧性。同时由于残余应力的存在,接头性能也会受到影响,这时可以通过焊后的一些热处理来优化接头组织,从而使接头力学性能得到提高。

固相焊接技术在连接金属间化合物方面优势颇大,对扩散焊而言,加工方法简单,且焊后接头性能较好,但设备成本较高;对于摩擦焊而言,不仅可以避免气孔、裂纹等缺陷的产生,且可以减少一些连接部件的使用,节省材料;总之,两种方法在焊接金属间化合物方面都有优势。在今后的焊接过程中,有两个重要问题需要考虑,一是工艺参数优化;二是由于中间层的选用很大程度提高了接头的性能,研究重点也将会放在中间层的选取上。

本文共有参考文献 31 篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 深蓝)