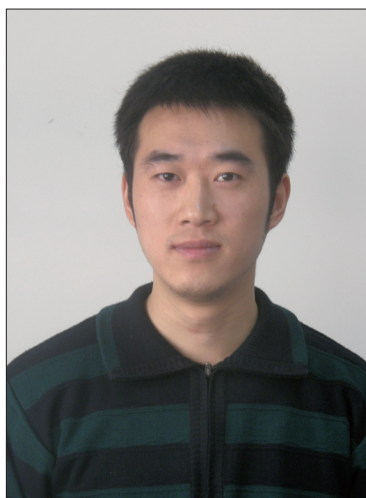


钛及钛合金焊接方法与研究现状

Welding Method and Research of Titanium and Titanium Alloy

洛阳船舶材料研究所 高福洋 廖志谦
西北工业大学材料科学与工程学院 李文亚



高福洋

硕士研究生,主要从事钛合金焊接工艺研究。

钛具有比强度高、耐海水及其他介质的腐蚀、耐低温,以及高温下具有高的疲劳强度、低的膨胀系数、良好的可加工性等优点,用其建造的结构在任何自然环境中都能充分发挥其作用。在舰船应用中,除利用其耐海水腐蚀和高比强度特点外,还有无磁、透声、抗冲击震动等优点,钛及钛合金在舰船中的使用大大延长了设

焊接作为一种重要的金属加工工艺,在工业生产和国防建设中起着重要作用。随着产业结构的变化和科学技术的发展,先进的焊接结构是降低材料消耗,减轻结构质量的有效途径,各种焊接技术有着广阔的应用前景。随着钛工业的发展,其焊接技术也越来越引起人们的重视。

备的使用寿命,减轻了重量,提升了设备及整舰船的技术战术性能,因此钛是一种优秀的舰船结构材料^[1-3]。

焊接作为一种重要的金属加工工艺,在工业生产和国防建设中起着重要作用。随着产业结构的变化和科学技术的发展,先进的焊接结构是降低材料消耗,减轻结构质量的有效途径,各种焊接技术有着广阔的应用前景。随着钛工业的发展,其焊接技术也越来越引起人们的重视。钛的熔点较高、导热性较差,因此在焊接时易因参数选用不当形成较大的熔池,并且熔池温度高,这使得焊缝及热影响区金属在高温停留的时间较长,晶粒长大倾向明显,使接头塑性和韧性降低,导致产生裂纹。所以钛及钛合金的焊接工艺方法是一个需

要不断解决完善的问题。

钛及其合金焊接特点

1 钛及其合金的物理化学性能

钛具有2种同素异形体,分别以 α 和 β 来表示,转变温度为 882.5°C ,其低温晶体 α 为密排六方晶格,在 882.5°C 以上稳定的 β 晶体为体心立方晶格。

钛的导热性较差,其导热系数比不锈钢略低。当钛中存在杂质时,其导热系数则有所下降。表1列出了工业纯钛与其他金属材料主要物理性能的比较。

2 钛合金的焊接组织

工业纯钛及 α 钛合金的焊接组织在常温下是单相,根据冷却速度的不同,生成锯齿状或针状组织。各种

表1 钛与其他金属材料主要物理性能比较

	钛	铝	镁	铁	镍	铜	锆	不锈钢
比重 / (g·cm ⁻³)	4.5	2.7	1.7	7.8	8.8	8.9	6.5	7.9
熔点 / °C	1668	660	650	1535	1455	1083	1830	1400
线膨胀系数 / (10 ⁻⁶ ·m·°C ⁻¹)	8.5	22.4	26	11.7	12.8	16.6	2.5	16.66
导热率 / (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	17.04	217.71	159.1	75.36	92.11	393.56	20.93	16.36
比热容 / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	523.35	9295	1046.7	460.55	628	385.19	276.33	502.32
弹性模量 / MPa	110250	69580	42140	196000	195020	127400	77518	198940
电阻率 / (μΩ·m)	0.195	0.026	0.039	0.097	0.068	0.017	0.446	0.072

机械性能与母材相比没有大的变化,焊接性能良好。 $\alpha + \beta$ 钛合金在从 β 相冷却的过程中,形成马氏体(α' 相), α' 相的数量和性质按合金组成和冷却速度发生变化。一般情况下,随 α' 相的增加,合金的延伸性、韧性降低,即使是焊接性良好的Ti-6Al-4V,当 β 稳定元素钒含量在5%以上时,焊接性能下降。 β 钛合金的马氏体生成温度低于室温,焊接处是亚稳定 β 相,所以焊接性不劣化。但因合金元素添加过多,往往缺乏延伸性。另外,时效和冷加工使合金强度提高,而焊接会使强度有所损失,故不大采用焊接接合^[4]。

3 钛合金的焊接缺陷

3.1 焊接接头区的脆化

钛及钛合金焊接区易受气体等杂质的污染而产生脆化。造成脆化的主要元素有O、N、H、C等。常温下钛及钛合金比较稳定,但随着温度的升高,钛及钛合金吸收O、N、H的能力也随之明显上升。Ti从250℃开始吸收氢,从400℃开始吸收氧,从600℃开始吸收氮。氮和氧对接头强度和弯曲塑性影响较大,随着焊缝中氮氧含量的增加,接头强度升高,弯曲塑性降低,氮的影响大于氧。氢主要影响接头的冲击韧性。

3.2 焊接区裂纹倾向

(1) 热裂纹。

由于钛及钛合金中含S、P、C等杂质较少,很少有低熔点共晶在晶界处生成,而且结晶温度区间很窄,焊

缝凝固时收缩量小,因此热裂纹敏感性低。

(2) 冷裂纹和延迟裂纹。

当焊缝含氧、氮量较高时,焊缝性能变脆,在较大的焊接应力作用下,会出现裂纹,这种裂纹是在较低温度下形成的。

在焊接钛合金时,热影响区有时也会出现延迟裂纹,氢是引起延迟裂纹形成的主要原因。防止延迟裂纹的办法,主要是减少焊接接头处氢的来源,必要时可进行真空退火处理,以减少焊接接头的氢含量。

3.3 焊缝气孔

气孔是钛及钛合金焊接中较为常见的缺陷,O₂、N₂、H₂、CO₂、H₂O都可能引起气孔。钛及钛合金焊缝气孔大多分布在熔合区附近,这是钛及钛合金气孔的一个特点。焊缝中的气孔不仅造成应力集中,而且使气孔周围金属的塑性降低,甚至导致整个焊接接头的断裂破坏,因此须严格控制气孔的生成^[5]。

钛及其合金焊接方法与研究现状

1 钨极氩弧焊

钨极氩弧焊是钛及其合金最常用的方法,它是连接薄板和打底焊的一种极好的方法,通过选用合适的工艺参数可以实现较为良好的焊接。其不足是焊速较慢、焊件变形较大、焊缝组织较粗大^[6];焊缝中易生产气孔以及钨夹杂等焊接缺陷;焊接过

程易出现气体保护不良而影响焊缝质量等。TIG焊的脉冲频率对钛合金的晶粒尺寸和形态都有影响,脉冲频率过高或过低时,焊缝区均为柱状晶,强度较低,频率适中时为等轴晶,对应的强度也高一些。近些年来印度对钛合金的TIG焊研究相对较为全面^[7]。

M. Balasubramaniana等通过对钛合金(Ti-6Al-4V)进行脉冲电弧焊实验研究发现晶粒尺寸和硬度与焊接参数之间具有如下关系:

$$\text{晶粒尺寸 } GS = 81.43 - 18.33P - 14.17B - 10.83F + 15T + 25.68P^2 + 18.18B^2 + 61.93F^2 + 25.68T^2;$$

$$\text{硬度 } H = 472.15 + 8.54P - 6.87B + 4.38F - 5.62T - 17.57P^2 - 12.57B^2 - 36.32F^2 - 15.07T^2 + 1.56PF。$$

其中, P 表示峰值电流,A; B 表示基值电流,A; F 表示频率,Hz; T 表示时间。经过试验测定,该模型预测晶粒尺寸和硬度的准确率可以达到99%的水平^[8]。

Balasubramanian等^[9]通过对脉冲TIG焊接参数对腐蚀行为影响的研究又发现,随着脉冲峰值电流的增加和脉冲频率的增大,接头的抗腐蚀能力上升,达到最优值后,随着脉冲峰值电流和脉冲频率的继续增加,抗腐蚀能力下降,同时随着晶粒纯度的增加抗腐蚀能力也会增大。但是对于能否在保证腐蚀最小的情况下,其他性能亦保持在较好的水平,可以通过上面公式计算出晶粒尺寸和硬度,从而预测其可能具有的性能。

国内较为关注的是A-TIG焊方法,该方法是近10年来发展起来的增大焊接熔深,改善焊缝成形和焊接质量,提高焊接生产效率的新技术。

对A-TIG焊熔深,Liu等^[10]采用单一活性焊剂试验后发现,在相同的工艺参数下,A-TIG焊的熔深较传统TIG焊大幅提高。进一步的试验结果表明氟氯化物活性剂能增加焊接熔深,即氟氯化物是增加钛合金

熔深的主要因素^[11]。

李晓红等^[12]通过试验确定,活性焊剂对钛合金焊缝成形的影响是非常明显的:在同等条件下不仅增大焊缝的熔深,减小焊缝的宽度,降低焊接时的热输入,还明显减小焊缝的晶粒尺寸;对不同厚度的钛合金材料进行 A-TIG 焊时,其焊缝的结晶形态是一致的,呈对向式从两侧母材向焊缝中心线上生长;A-TIG 焊时焊缝的横剖面形状与 TIG 焊时有很大差异,其形状呈现出单面焊双面成形的杯状特征,该形貌特征对焊缝力学性能有改善。

作为技术核心的活性剂配方是制约该项技术发展的瓶颈。由于对配方的研究较为复杂,国内通过引进和正交试验以及均匀试验法等找寻合适的材料,由于作用机理不同,较好的单独作用的材料混合后,效果可能下降,因此对活性剂的研究还需要进一步的实验研究探索。

2 等离子弧焊

由于等离子弧焊的焊接规范窄,焊接稳定性及重复性差的缺点已经成为制约等离子弧焊工业应用进程及自身技术发展的突出障碍。20世纪90年代以来,由于等离子弧焊接设备制造水平及控制技术不断提高,等离子弧焊接稳定性问题在很大程度上得以改善。因此,在穿孔等离子弧焊过程中,掌握影响焊接稳定性的因素及作用规律,利用先进的控制技术,进一步提高焊接自动化及控制精确化程度,必然是今后的研究重点。

廖志谦等^[13]的研究结果表明,等离子焊接接头拉伸性能良好,与母材性能相当,焊缝冲击韧性较母材有所下降,焊缝组织为残余 β 相和马氏体针状 α 相,与接头拉伸性能、冲击性能及接头硬度分布相对应,这些组织具有超过母材金属的硬度和强度,但塑性低。

穿孔焊接时,存在穿孔起弧不稳定及穿孔后线能量不能维持在最小

值等问题,这是实现穿孔稳定焊接需要解决的问题。裴利程^[14]主要研究了起弧参数对穿孔加热过程和挖掘过程的作用规律,并通过控制穿孔时刻的温度场分布,实现了起弧的稳定成形。该研究通过试验分析发现,焊接电流是影响穿孔加热过程及温度场分布状态的決定因素,离子气流量在焊接加热过程中主要影响穿孔时间。焊接电流和离子气流量对未穿透阶段熔池深度和小孔形状的影响同等重要。通过调节起弧程序,使穿孔时刻小孔周围的温度场分布接近优良焊缝的稳态温度场分布,并保证送丝时刻提前于穿孔时刻1~2s,可实现起弧段的稳定过渡及成形控制。

Chen等^[15]发现,动态控制等离子焊接可以在保证焊透的情况下,通过控制峰值电流和基态电流使得等离子弧焊在穿孔型焊接和熔透型焊接之间转换,从而在最小的热输入条件下满足焊缝使用条件。与常规等离子焊接相比,由于热输入减少,接头熔合区减小而且晶粒尺寸减小,虽然微观结构变化不大但焊缝中先析出的 β 相晶粒大幅度减少,从而使马氏体的形成得到抑制,焊接接头具有更好的韧性和更高的硬度^[15]。

3 真空电子束焊

真空电子束焊非常适合钛及钛合金的焊接。这主要是因为它具有一系列的优点:焊接冶金质量好、焊缝窄、深宽比大、焊接角变形小、焊缝及热影响区晶粒细小、接头性能好、焊缝和热影响区不会被空气污染、焊接厚件时效率高等。其缺点是焊缝中易出现气孔,结构尺寸易受真空室限制,不适合于大批量生产,但对小尺寸工件其质量具有绝对优势。

焊接接头中会产生相当大的残余应力,并随焊接件厚度的增大而增加,因此研究人员探寻了电子束局部热处理降低残余应力的可能性。经过试验测定^[16]发现:电子束局部热处理可以改善钛合金焊缝组织性能,

使焊缝区晶粒组织得到细化,不仅使焊缝中心的纵向拉应力峰值外移,而且使得焊缝中心的横向残余应力为压应力,大大改善了焊接残余应力分布状况,提高了焊接质量。对于14.5mm厚板也发现了类似的现象^[17],进一步证明对厚板钛合金来说,电子束局部热处理对改善焊接残余应力状况、提升焊接质量有显著的作用。

由于大厚板较大的残余应力,使得真空电子束焊较多应用在薄板上。对大厚板钛合金的电子束焊接, Lu等^[18]进行了相关试验,发现微观结构是典型的包含 α 相和薄片状的($\alpha + \beta$)双相结构的TC4-DT,通过电子束焊接可以得到不含沉积缺陷的优质焊接接头。其中熔合区形成马氏体的篮网组织,层层堆积的先析 β 相晶界在焊缝金属的上层和中部清晰可见,但在底部不是那么明显,而且 β 晶粒尺寸和马氏体长度从熔合区顶部到底部逐渐减小。热影响区的组织微观结构不均匀,靠近熔合区的热影响区由针状马氏体和少量初生 α 相组成,而靠近母材的热影响区则由初生 α 相和含有针状 α 的转变 β 相组成。这两部分热影响区的边界取决于焊缝冷却过程中 β 相的转变温度。随着板厚方向上深度的增加,熔合区晶粒尺寸减小,显微硬度增加。该试验为今后对大厚板钛合金的深入研究和理论分析及应用提供了很好的试验基础。

4 激光焊

激光焊的质量和效率均优于其他焊接方法。激光易用反射镜或棱镜改变光路,可在工件的任意位置上焊接。激光焊对于钛及钛合金的薄板及精密零件的焊接可能具有更广泛的应用前景。但激光焊也有其不足之处:穿透力不如电子束强。

对激光焊接钛合金板材后的性能,相关研究表明,激光焊接接头的力学性能受到焊缝成形和焊缝组织的影响^[19-20]。当焊接热输入量较大

时,焊缝中存在密集散乱排布的针状马氏体,使得抗拉强度值提高。而当焊缝中出现粗大的柱状晶组织时,焊接接头的屈服强度和相对位移量减小,降低接头的塑韧性。通过合理的参数选择,可以实现接头抗拉强度、抗剪强度等性能与母材相当,而接头的疲劳性能经真空热处理后能得到明显改善。虽然真空热处理后弯曲角改善但只能达到母材的1/2。因此,在钛合金结构设计时应避免将焊缝置于最大弯矩处。

激光焊接的优势很明显,但目前来说,激光焊接涉及影响钛合金焊接质量的气体保护、试件清理和光致等离子体控制等方面的工艺问题,迫切需改进和完善。由于激光焊接存在的问题,采用激光复合焊接技术可以减小甚至消除激光焊接中出现的缺陷,从而可以提高焊缝的焊接质量。

对激光复合焊接后的质量, Li 等^[21]试验结果表明,在合适的焊接条件下可以形成没有表面氧化、气孔、裂纹和未焊透等焊接缺陷的优良焊缝。与LBW相比, laser-MIG 焊接头的延展性更好,采用低强度的TA10焊丝可以改善焊缝成形质量降低微观硬度,但热影响区的硬度可能由于较大的热输入而大幅度上升。J. Zhou 等^[22]认为 Laser-MIG 焊接技术可以消除微裂纹,阻碍气孔的形成以及改善焊缝的组成。通过在焊丝中加入一些抗裂纹的元素可以减少和消除诸如焊缝热裂纹敏感性高和强度降低等缺陷。而焊丝熔滴进入母材的混合及扩散程度受到熔池中液体流动动力学的影响很大^[22]。这就需要在今后的研究中,注意找寻更为合适的焊丝和合理的工艺参数组合,从而保证良好的焊接质量。

激光与MIG或TIG等其他方法如何合理组合才能保证复合焊接的最优性能,是科研工作者在不断探寻的问题。Chen 等^[23-24]通过研究发现

激光能量密度决定了锁孔的形成与消失。为此,他们对激光在电弧中穿过时的传播特性与吸收特性进行了计算和定量的测量,从而证实了激光-TIG复合热源焊接有限增强熔深、存在焊接机制转变的观点,从而为优化复合焊接效果提供了依据。

除了减少缺陷外,复合焊接后微观组织也与单纯的激光焊接后的组织有所不同。激光焊和复合焊接技术焊缝中均存在 α 相,在激光焊中含有粗糙的柱状 α 相和少量细小的针状 α 相,而复合焊接头的微观结构中包含针状 α 、薄片状 α 以及孪晶相,这种微观结构使得复合焊接头具有良好的连接强度和延展性^[25]。通过EDX分析可以发现焊缝熔合区中氧的密度分数的确比母材高,但不能以此认为氧含量就是在给定焊速条件下影响焊缝硬度的唯一因素。最终硬度应与冷却速度和氧氮含量的因素的交互影响有关。

其他诸如保护气体、气流大小以及 Laser 与电极间的距离等都是需要进行研究的参数,这样可以使复合焊接更加优化,从而产生最合乎需要的焊缝。相关知识库的建立则有助于实现自动化。

5 扩散焊

目前扩散焊较多地应用于钛合金与不锈钢间的焊接。优点是空气对焊缝污染少、变形小、节省材料,但要求待焊表面清洁度高,清除一切杂物。采用恒温恒压扩散焊、相变超塑性扩散焊和脉冲加压扩散焊实现了钛合金和不锈钢的焊接,物相分析发现钛合金-不锈钢接头中存在 Fe_2Ti 和 $\sigma-(\text{FeCr})$ 这两种脆性金属间化合物^[26]。由于脉冲加压扩散焊能促进扩散过程的进行,减少脆性金属间化合物的产生,并改善其分布,是一种较有应用前景的扩散焊方法。为避免和减少脆性金属间化合物的产生,扩散焊接进一步发展的形式是在钛件表面上先镀一层铜或镍,或夹一

层0.05~0.03mm的铜或镍^[27]。

钛合金与不锈钢异质接头采用扩散焊直接焊接时,很难避免接头应力和脆性的金属间化合物相的出现,从而容易使焊接接头产生裂纹,因此大多采用了中间层金属^[28],且采用中间过渡层并产生微观机械咬合的接头性能较好。通过对不同工艺下接头和母材的微观组织和抗拉性能的研究发现^[29],添加Ni基合金作为中间层材料进行扩散焊接,其接头的扩散带组织都较好,没有出现孔洞和空隙等焊接缺陷。焊接温度升高和保温时间延长使扩散层宽度增加,但也会造成所有组织晶粒长大,从而使接头的性能下降。因此,在综合考虑工艺参数对接头性能的影响规律,从而确定可能的最佳工艺时,应在保证接头焊接质量的前提下,优先选择焊接温度较低,保温时间较短的工艺。

6 钎焊

钎焊是钛及其合金与其他金属最简单可靠的连接方法。纯钛在882.5℃发生同素异构转变,从密排六方结构的 α 相转变为体心立方结构的 β 相。钛合金的同素异构转变决定了其钎焊工艺过程受限于温度及时间,当高于($\alpha-\beta$)相变温度时,其组织和性能将发生重要变化。从冶金学角度分析,更重要的是由基体与钎料反应生成脆性相,使得钎焊接头性能恶化^[30]。综上所述,选择合适的钎料,尽可能保持在 β 相转变温度以下对钛合金进行钎焊是基本原则。这样既可以保持母材性能,也能形成优良力学性能的钎焊接头。

针对高温钛合金TA15材料淮军锋等^[31]率先开展了钎焊及扩散处理的连接工艺研究工作,通过采用先进的钎焊材料及优化的真空钎焊与扩散处理工艺,对该材料实施了有效的连接,并采用电子显微组织与能谱等手段,分析了钎焊接头界面的元素分布及钎焊接头的组织。钎焊材料的成分设计合理,真空钎

焊工艺合理可行。钎料中的 Cu、Ni 元素属于 β 相稳定元素,其含量在 30% 左右,钎焊的钛合金焊缝可在钎焊温度下热处理使其组织趋于稳定的片层状组织^[31]。

陈树海等^[32]以铝硅共晶合金为填充材料,采用激光熔钎焊的方法对铝/钛异种合金进行焊接,获得了同时具有熔焊和钎焊双重特征的焊接接头。由于激光局部加热并且有很高的冷却速度,发现在钛合金附近的钎焊界面形成了特殊的形态结构。焊缝上部界面金属间化合物较厚,主要呈锯齿状;焊缝下部界面金属间化合物厚度不足 $1\mu\text{m}$,呈薄层状。界面金属间化合物的主要成分为 TiAl_3 ,以 $\text{Ti}(\text{Si}_x\text{Al}_{1-x})_3$ 结构的置换固溶体形式存在。底部界面容易成为裂纹产生的源头,裂纹多沿界面附近焊缝中的共晶组织扩展,接头的平均抗拉强度约为铝母材的 85%^[32]。

7 搅拌摩擦焊

传统条件下,钛合金材料可以采用熔焊方法进行焊接。但是由于熔焊条件苛刻、过程复杂,并且容易产生缺陷和接头强度较低等原因,人们开始探索利用新型的搅拌摩擦焊技术(FSW)来解决和改善钛合金材料的焊接。根据英国焊接研究所提供的资料和参考国外公开发表的文献资料,钛合金和镍基高温合金搅拌摩擦焊焊接所需要的搅拌头,最好采用纯钨、钨-铼合金、钨-钽合金或者立方氮化硼(PCBN)材料。

栾国红等^[33]采用一种以粉末冶金成形的钨-铼合金材料作为钛合金搅拌摩擦焊焊接头对 TC4 钛合金进行了搅拌摩擦焊的试验研究。结果显示 TC4 钛合金搅拌摩擦焊接头的强度几乎达到母材强度(895MPa),但是接头的延伸率相对较低,焊接方法的工艺参数有待优化,焊接过程保护有待完善。仔细测量和观察发现,搅拌头并未出现剧烈磨损,而是完全被焊缝钛合金材料粘

着和填充,焊缝中也容易出现孔洞缺陷^[33]。这与材料超塑性、焊接工艺参数的选择等有关,后续研究还需要对搅拌头进行改进,如表面镀膜等。

进一步研究显示,用 PCBN 与 W-Re 合金制作搅拌头能够得到焊缝成形美观、内部无缺陷的搅拌摩擦焊接头。钛合金 FSW 接头强度与母材相比有所下降。接头的断后伸长率与母材相比明显降低:随着焊接热输入的增加,接头的抗拉强度和断后伸长率均降低。在钛合金的 FSW 过程中,搅拌头前方轴肩附近的温度梯度最大,而在搅拌头后方轴肩附近的温度梯度最小:焊缝中心的峰值温度超过钛合金的相变温度区间,由焊缝中心向外峰值温度逐渐降低^[34]。这些研究为找寻合适的材料研制钛合金 FSW 工具和相应的装备以及制定加工工艺提供了依据。

后续研究通过加入一定量的氢改变钛合金的塑性,降低对搅拌头性能的要求,从而更好地实现搅拌摩擦焊,争取将搅拌摩擦焊的最高温度控制在相变点附近,而氢可通过焊后去氢处理消除^[35]。对置氢后钛合金搅拌摩擦焊接头组织及力学性能的研究^[36]发现:置氢后,TC4 钛合金搅拌摩擦焊比传统钛合金搅拌摩擦焊表面成形性更好,组织及力学性能良好,热机加工性能得到明显改善,接头组织相对细小,热影响区因热和变形的共同作用使得 α 相与 β 相发生变化,进而改善焊缝性能,但应注意控制氢的量,置氢 0.1% 的钛合金要比置氢 0.4% 的钛合金塑性更好。

结束语

通过研制 A-TIG 焊可以使 TIG 高效地应用在钛合金焊接中,减少或消除了 TIG 等电弧焊接在钛合金焊接中所可能产生的缺陷,使得其成为焊接钛合金中最为便捷成本最低的焊接方法。改进激光焊接方法采用复合热源焊接,不仅弥补了激光焊焊

接工作厚度相对较小的缺点,而且也减少了焊接中可能出现的缺陷,同时也降低了成本,提高了效率。对等离子焊接在焊接大厚度焊缝中依旧具有其独特的优势,其穿孔深熔焊存在的监控困难和热输入较大,焊缝质量欠佳问题是亟需解决进而提高焊接质量的问题,稳定起弧动态控制方法是一种较为合理可行的改进方案。扩散焊接在异种金属焊接方面有优异的表现,相比于钎焊,其优点显著,接头使用温度与强度不受限于钎料,焊接头的显微组织和性能与母材接近或相同,在焊缝中不存在各种熔化焊缺陷,也不存在具有过热组织的热影响区,工艺参数易控制,零件变形小,可焊接大断面接头,可焊接其他焊接方法难以焊接的材料,特别适合应用于钛合金与其他异种金属及陶瓷材料的连接。对搅拌摩擦焊需要解决搅拌工具的开发,继而完成相关加工工艺技术的研究,它将成为未来国内较为重视的方法。其他诸如线性摩擦焊等方法在实际加工应用中的效果也很好。

其他一些焊接方法也在进一步的研制开发中,如表面自纳米化、相变超塑性扩散连接及自蔓延技术的应用,使得钛合金的焊接方法可以多样化、高效化,进而满足不同的焊接需求。今后的研究将以建立各方法中焊接参数对钛合金焊缝成形和熔深的定量影响机理为核心,针对不同的被焊材料制定相应的焊接工艺和操作规程,最终开发出一套钛合金焊接技术应用的知识库,其主要内容包括生产-应用情况、安全性、力学性能和冶金性能、抗腐蚀性、熔深再研性以及母材成分变化影响等诸多方面。

本文共有参考文献 36 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)