

钛合金电子束焊接的研究进展

Research Progress of Titanium Alloy by Electron Beam Welding

首都航天机械公司 袁双喜 沙庆涛 徐培麒



袁双喜

首都航天机械公司技术员, 硕士, 毕业于哈尔滨工业大学材料加工工程(焊接)专业, 主要研究方向为高能束焊接和新材料的连接。

随着科学技术的不断进步, 对航空航天飞行器的性能要求越来越高, 这就对航空航天材料及其加工技术提出了新的挑战。众所周知, 航空航天飞行器的飞行速度、飞行距离、运载能力和机动性能极大地受到机体重量的制约, 因此, 轻质、高强的新

轻质、高强的新型材料已成为人们迫切寻求的目标; 而优化的焊接结构则是降低材料消耗、减轻结构重量的有效途径。钛合金具有比强度高、抗腐蚀性好、耐高温以及韧性和焊接性较好等一系列优点, 所以在航空航天飞行器中推广应用钛合金焊接结构已成为人们关注的重点。

型材料已成为人们迫切寻求的目标; 而优化的焊接结构则是降低材料消耗、减轻结构重量的有效途径。钛合金具有比强度高、抗腐蚀性好、耐高温以及韧性和焊接性较好等一系列优点, 所以在航空航天飞行器中推广应用钛合金焊接结构已成为人们关注的重点^[1]。

适于钛合金焊接的方法有很多, 包括钨极氩弧焊、等离子弧焊、电子束焊、激光焊等。钛的化学活性强, 随着温度的升高, 在固态下能强烈地吸收各种气体, 这会使焊接接头的塑性和韧性急剧下降^[2], 因此, 如何提高接头的塑性和韧性是钛合金熔化焊接时的关键。

电子束焊接(Electron Beam Welding, EBW)是在真空条件下以聚焦的高能密度电子束作为能量载

体, 实现材料和构件焊接的一种方法^[3]。电子束焊接具有以下特点: 焊缝热输入量小, 焊缝和热影响区宽度不到气体保护焊的 1/15; 焊接变形小; 电子束能量密度大, 穿透能力强, 获得焊缝深宽比大, 对于厚件可以在不开坡口的情况下一次成形; 焊接在真空环境下进行, 保护良好; 焊接设备精度高, 工艺重复性和再现性好。因此, 在焊接钛合金时, 特别是对于航空航天领域中使用的大厚度钛合金构件, 电子束焊接当仁不让成为首选^[4]。

钛合金的焊接性分析

钛的化学活性强, 随着温度的升高, 其化学活性也将迅速升高, 并在固态下强烈地吸收各种气体。钛从 250℃ 开始吸收氢, 400℃ 开始吸收

氧,600℃开始吸收氮,而空气中含有大量氮和氧。含有氮、氢、氧等杂质元素的纯钛的焊接接头塑性和韧性会急剧下降。此外,钛的熔点高,热容量大,电阻系数大,热导率低,焊接时单位体积内热量集中,熔池增大,焊缝和热影响区变宽,晶粒易长大,形成过热组织,导致焊接接头塑性下降。因此,控制焊接线能量十分重要,在焊接时应采用小电流、高焊速的焊接规范,必要时可使用导热性好的工装。钛和钛合金的弹性模量较低,焊接时变形大,且难校正,焊接时采用小的线能量,注意焊接顺序和焊接方向,有利于控制焊接变形^[5]。

钛合金焊接接头中的气孔是主要缺陷。保护气体的纯度、焊件表面的清理和工艺参数都是影响气孔产生的重要因素。在高温条件下,钛与氮、氢、氧反应速度较快,且生成物不致密。氧、氮等杂质常处在晶格的间隙位置,阻碍位错移动,显著提高了钛的硬度和强度。而且,钛在吸收氮、氢、氧后形成间隙固溶体化合物,使焊接接头的塑性和韧性降低,引起接头脆化,产生裂纹。如果焊缝含氢量过多,就会出现细片状或针状析出物 TiH_2 ,它的强度低,加之形状为片状或针状,其作用就像微形缺口,使焊缝冲击性能下降^[6]。

真空电子束焊接具有一系列优点,很适合于钛合金的焊接。电子束焊接时,焊缝金属加热到高于熔点的温度,冷却后获得马氏体或近马氏体类型的片状组织。

钛合金电子束焊接国内研究现状

(1) 王利发等^[7]和刘昌奎等^[8]研究了2.5mm厚TA15钛合金电子束焊接接头的显微组织和力学性能,结果表明,焊缝为均匀的等轴晶,晶粒尺寸一般在0.2~0.3mm之间,热影响区的宽度在1~2mm,由粗大等轴 α +片块状 α 及针状 α 组

成,焊缝韧性降低,抗拉强度高于母材;疲劳裂纹大多萌生于焊缝内以及焊接热影响区的气孔处。高莹等^[9]对TB2钛合金电子束焊接接头的组织与性能进行了试验研究,焊缝中心呈胞状树枝晶铸造组织,焊缝区内有弥散 α 析出的 β 晶粒,热影响区晶粒长大不是很明显。板材焊前的热处理状态对接头的抗拉强度和延伸率有很大影响。

(2) 许鸿吉等^[10]研究了14mm厚TC4的钛合金电子束焊接接头的组织和性能,TC4钛合金电子束焊接接头室温拉伸强度与母材相等,接头的塑性好。焊缝组织是由较粗大的原始 β 相转变而成的 α' 相,即针状马氏体,热影响区组织为均匀且细小的针状马氏体和原始 α 相的混合物。尹丽香等^[11]研究了14mm厚TC4钛合金电子束焊接接头的高温性能与组织,接头经高温拉伸及持久拉伸后,其焊缝晶粒明显长大,持续的高温并没有增大焊缝晶粒的长大趋势,TC4钛合金电子束焊接接头高温抗拉强度和高温持久强度都略低于母材,断后伸长率和断面收缩率也很高。付鹏飞等^[12]对TA12钛合金电子束焊接接头组织性能及残余应力进行了分析,焊缝熔合区存在大量细长的 α' 马氏体及 α 相组织,分散细小的稀土相颗粒均匀分布于焊缝区;随着距焊缝距离的增加,过渡区马氏体组织逐渐减少,稀土相尺寸逐渐增大,数量逐渐减少。

(3) 陈志勇等^[13]研究了Ti-60钛合金电子束焊接接头高温下的失效与变形行为,接头熔合区和热影响区的显微组织为交错排列的较细马氏体板条或 α 板条,而母材区显微组织为集束状排列的较粗大 α 板条。在600℃拉伸试验条件下,焊接接头熔合区和热影响区抗变形能力比母材区强。持久试验时,焊接接头的断裂位置与外加应力大小有关,在外加应力较低的情况下,持久

变形机制为扩散控制的位错攀移机制,试样断裂于接头熔合区;在外加应力较高的情况下,持久变形转由位错滑移机制控制,持久试样断裂于母材区。在600℃高周疲劳条件下,焊接接头中疲劳裂纹易萌生于母材的表面或次表面,焊接接头母材区中的位错运动以贯穿整个板条集束的位错滑移为主,滑移距离较大。接头熔合区中位错运动主要局限于单个马氏体板条内部,位错运动特征为攀移+少量滑移^[14]。

钛合金电子束焊接国外研究现状

(1) Suresh等^[15]研究了17.5mm厚的Ti-6Al-4V钛合金的电子束焊接工艺,所用焊机熔深只能达到12.5mm,在单道焊的情况下产生未熔透,采用双面焊能够实现全熔透现象,从母材到焊缝区硬度值基本一致,接头显微组织与一次熔透的焊缝相似。在正面焊接结束后,尽早进行背面施焊可以减轻对接头的污染,从而减少熔合区的孔洞。Rao等^[16]通过多道焊来提高Ti-6Al-4V合金电子束焊接接头的抗摆锤冲击性和断裂韧性,结果显示焊接接头的硬度高于母材,多道焊能够降低焊缝金属的硬度。这是因为单道焊接头组织内含有大量位错,而多道焊接头中位错数量显著降低^[17]。

(2) Mohandas等^[18]研究了双相钛合金VT9电子束焊接接头的冲击韧性,并研究了母材热处理状态对焊接质量的影响。结果表明,熔合区晶粒的宽度决定了接头的冲击韧性。 β 相区热处理的钛合金熔合区沿裂纹路径的晶粒宽度大于在双相区热处理的钛合金,因此冲击韧性更优。过饱和和亚饱和区的焊后热处理都能提高接头的韧性。Mohandas等^[19]对双相钛合金VT9电子束焊接接头与摩擦焊接头的低周疲劳性能进行了对比,摩擦焊接头的低周疲劳性能

优于电子束接头,这是因为电子束接头中含有粗大的 β 相,而摩擦焊接头中只含有细小的 β 相。Babu等^[20]研究了电子束束流振荡对Ti-6Al-4V焊缝疲劳性能的影响,结果显示采用椭圆波形束流振荡技术的焊缝抗拉强度低于不采用振荡束流的焊缝,同时也使焊缝的疲劳寿命减小。这是由于振荡束流降低了冷却速度,使得 α 片层增宽所致。

数值模拟的研究现状

1 焊接温度场

焊接的热过程是极其复杂的,其复杂性主要表现为:焊接热源能量密度分布梯度大,加热极不均匀;焊接加热速度极快,在很短的时间内热源把大量的热能传递给焊件;焊接热源相对于工件移动,传热过程不稳定;焊接熔池中金属强烈运动,内部进行一系列的物理化学反应。

焊接热过程的数值分析开始于20世纪70年代,迄今已有30多年的发展历程。通过数值模拟可以分析各类焊接过程的热循环和温度场分布特征,分析高能束焊接过程中束孔形状分布特征以及温度分布对组织和性能的影响等情况。目前的研究结果认为,钛合金电子束焊接时,表面温度的高温区集中在焊缝两侧很窄的范围内,焊缝两侧温度梯度较大,在深度方向上,由于电子束的穿透能力强,温度梯度较小^[17,21-22]。

在发展焊接数值模拟技术和建立数学模型的过程中,应十分重视试验验证工作,充分考虑相关现象的所有知识,使数学模型能真实地反映现象的本质和规律。只有这样才能使焊接数值模拟得到真正发展和成功应用。目前尚存在的主要问题是:

(1) 材料的热物理性能数据不足。许多材料的热物理性能的数据(如比热容、热导率及密度等)在高温特别是在接近熔化态时还是空白,这给非线性计算带来了困难。

(2) 热源分布参数的确定。电弧的有效加热半径及热量分布形式与焊接方法和参数有关,目前缺乏系统而准确的资料。

(3) 电弧功率有效利用系数的选取。

(4) 焊接熔池的处理。焊接热传导的分析基于固体导热微分方程式,没有考虑焊接熔池内部液态金属的对流传热特点。

2 焊接应力场

焊接应力和变形的存在是导致焊接裂纹产生以及接头强度与性能降低的重要因素。焊接残余应力的产生机理及焊接过程中瞬态热应力应变场的研究一直是焊接工作者关注的问题。研究焊接应力和应变的数值方法有热弹塑性有限元分析、固有应变法、粘弹塑性分析,需要考虑相变与热应力耦合效应等。其中,有限元方法是焊接结构热力学分析最重要的手段之一,同时也是一种极其复杂的分析。

(1) 胡美娟等^[17]采用ANSYS有限元分析软件对12mm厚TC4钛合金平板的电子束焊接进行了数值模拟,建立了12mm厚钛合金平板电子束焊接温度场和应力场的三维有限元数值计算模型。模型采用圆锥体热源,考虑到了电子束焊接时的小孔效应;残余应力以纵向残余应力为主,高值纵向残余拉应力集中分布在焊缝中心线两侧距焊缝中心线4mm的范围内^[23]。

(2) 刘敏等^[21]基于热弹塑性有限元理论,建立了钛合金大厚度试件电子束焊接残余应力的三维数值分析模型,分析研究了厚度为75mm的TC4电子束焊接试件残余应力的分布规律。计算结果表明,大厚度电子束焊接试件在焊缝及其附近宽度40mm左右的区域内存在极其复杂的残余应力,试件表面的焊缝及其附近20mm左右的区域存在着对结构强度有利的横向残余压应力,但

试件内部残余应力会高于表面的残余应力,尤其是在距起始和收尾端10mm及约1/4厚度处的区域,存在着二向的残余拉应力,且数值较高,这会对钛合金平板电子束焊接接头的力学性能产生重要影响,应引起足够的重视。由于上述模型计算时加载步数过多,效率较低,刘敏等^[22]根据研究需要对分析过程进行了简化。简化的方法是把电子束能量沿焊缝中心一次同时加入,然后分别计算其温度场和残余应力。利用模型的对称性使分析模型规模进一步缩减,且加载步数也大大减少,从而缩短分析时间,提高计算效率。

综上所述,对于薄板钛合金的焊接来说,残余应力是两向的,其中主要是表面应力,厚度方向的应力可以忽略。对于厚板来说,情况要复杂得多。总的说来,钛合金的电子束焊接焊缝附近的残余应力数值较大,甚至接近材料的屈服强度。

结束语

钛合金在航空航天产品上的应用主要有2个方向:一是利用钛合金优异的高温性能取代不锈钢大型焊接结构;二是利用钛合金良好的低温强度和塑性满足特殊结构的使用要求。未来,航空、航天技术仍会保持快速的发展步伐,选用轻质高强度材料是提高航空、航天器运载能力的有效手段。由于钛合金材料优异的性能,它在未来必将有更为广泛的应用前景,这就为广大航空、航天工作者指明了工作方向,也提出了新的挑战。如何研制具有更优性能的钛合金材料和更先进的焊接技术,并快捷地推进它在航空、航天领域的应用将是未来发展的重要方向。

注:本文有参考文献23篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。

(责编 蔚蓝)