

【编者按】2012年，“天宫一号”航天飞船胜利遨游太空；“蛟龙”号深水探测器成功下潜超越7000m，作为2012年最振奋国人的两大科技项目，它们所用的加工技术也是世界一流的。“天宫一号”的筒体焊接设备研制，以及“蛟龙”号的钛合金焊接技术，都是其中的关键点，为了解其中的特点，本刊邀相关企业专家撰写相应项目焊接设备或焊接关键技术，以飨读者。



刘鹏飞：特焊中心研发部部长

中国船舶重工集团公司第七二五研究所 (河南洛阳 471000) 刘鹏飞

钛及钛合金结构 焊接技术研究进展

一、概述

钛是继铝、铁、镁后在地壳中含量最大的金属元素，1791年英国化学家格雷戈尔在钛铁矿和金红石中发现了钛元素，此后200多年来，全球各国科学家对钛做了大量的研究工作，逐渐认识到钛的各项性能。钛的密度小、比强度大，硬度与钢铁差不多，而重量几乎只是同体积钢铁的一半，钛虽然比铝重，但硬度却是铝的两倍；钛的导热系数小，只有碳钢的1/5；钛无毒、无磁性，还具有良好的耐热性和耐低温性；良好的耐腐蚀性能，在空气中或含氧介质中，钛表面易形成附着力强、致密的高惰性氧化膜，保护钛基体不被腐蚀。因此钛及其合金被广泛应用于建筑、化工、医药、航天、航空、造船、海水淡化及海洋工程等领域。

随着钛及其合金应用范围的不断扩大，钛及钛合金的焊接问题就显得非常重要了，因此本文就钛及钛合金焊接技术进行论述。

二、钛及钛合金焊接问题

尽管钛及钛合金在性能方面具有很多优点，但钛合金在热加工方面也具有一个致命的弱点，就是钛合金在热加工过程中，与氧、氮、碳、氢具有很强的结合力，300℃吸氢、400℃吸氧、600℃吸

氮。氧、氮、碳、氢都能极大提高钛及钛合金的强度，严重降低其塑性和韧性，在组织应力作用下极易产生裂纹，降低钛及钛合金结构的使用性能。且由于航空航天工具、化工设备、水面水下舰艇结构较复杂及焊接条件较差等原因，使得钛及钛合金焊接远比一般金属焊接要困难得多。

三、钛及钛合金焊接技术现状

1. 钛及钛合金焊接技术特点

(1) 钛及钛合金化学活性较强，焊缝对杂质和气孔比较敏感。在焊接情况下极易被空气、水分、油脂和氧化皮等污染，而导致焊缝中溶入氧、氮、碳、氢等杂质，降低焊接接头的塑性和韧性。

(2) 钛及钛合金焊缝晶粒长大倾向较大。由于钛具有熔点较高、热容量较大、电阻率较大等特点，导致钛及钛合金的焊接熔池具有更高的温度，热影响区高温停留时间较长，从而引起接头过热，晶粒粗大，降低了接头的塑性。

(3) 钛及钛合金焊缝冷却时易形成脆性相。对于 β 相和 $\alpha+\beta$ 相钛合金，在焊后快速冷却条件下，一部分 β 相还可能形成脆硬相，极大地降低了接头的塑性。

(4) 由于钛及钛合金弹性模量较小，所以大

尺度钛及钛合金在焊接过程中在应力作用下变形量较大。

大尺度钛及钛合金结构焊接保护措施：钛合金的焊接需要在气体保护或真空状态下进行，特别是大尺度复杂结构钛合金构件，需要较为复杂的保护气工装或较大的真空室。

(5) 钛及钛合金焊缝易形成冷裂纹。由于钛合金在不同温度下对氢气的溶解度差异较大，且钛及钛合金膨胀系数较大，因此在温度变化时易引起较大的内应力，导致钛及钛合金焊缝易产生冷裂纹。

2. 钛及钛合金焊接方法

(1) 焊接特点 由于钛及钛合金的特点，因此常规的手工焊和CO₂气体保护焊不能应用到该类材料的焊接，早期还有埋弧焊配盐基焊剂焊接钛及钛合金结构，但焊接的效果极差，没有获得大范围应用。随着焊接设备技术的进步及多年焊接技术的研究，一些新的焊接方法，如红外铜焊、TIG焊、激光焊、等离子弧焊，电子束焊、电阻焊，钎焊及直流电子焊等被广泛应用到钛及钛合金结构的焊接。

(2) 焊接方法 钛及钛合金的焊接有以下几种方法。

TIG焊：是钛及钛合金焊接的最常用方法之一，焊接时使用小电流直流电焊接，焊接速度较低，且焊道较薄，因此焊接效率较低，且多道焊易造成晶粒长大，基本采用与母材同质但杂质含量低的钛丝或纯钛丝进行。由于钛及钛合金在高温时易被H、O和N污染，因此气孔是TIG焊一直无缝彻底解决的问题，即使工件处于高温状况时使用Ar气拖曳保护罩进行保护，也存在大量的焊接修补工作。随着活性TIG焊、热丝TIG焊的开发应用，使TIG焊的生产率有了明显地提高。

MIG焊：是利用连续送进的焊丝与工件之间燃烧的电弧作热源，在焊枪喷嘴喷出的气体保护下进行焊接的一种方法。该焊接方法的主要优点是可以进行全位置焊接，具有焊接速度快、熔敷率高等优点。MIG焊在低合金高强钢、铝合金等材料的焊接方面已经大量应用，但在钛合金的焊接方面应用还不是很多，主要是由于钛及钛合金电阻率较大，不能稳定传递MIG焊所需的大电流，且钛的硬度较

大，容易磨损喷嘴而影响焊接稳定性。当前对钛合金MIG焊的焊缝质量研究还不够深，但电弧稳定性，焊缝的微观组织方面，MIG焊和TIG焊相比没有什么太多差别。

电子束焊：是在真空环境下，利用会聚的高速电子流轰击工件接缝处产生热能，使得被焊金属熔化的一种焊接方法。该方法具有功率密度高、焊接速度快、热影响区小、焊接变形小等特点，因此电子束焊被广泛用于航空、航海等质量要求高的重要部件的焊接。钛合金电子束焊可以在高真空环境下进行，也可以在氦气介质下进行。尽管电子束焊能够很好的防止气孔的产生，但电子束焊也有一个不可避免的缺陷，就是焊接裂纹的产生。由于电子束焊的能力集中，因此在焊接过程中，可以使得钛合金焊缝部位金属瞬间熔化，但钛合金导热系数小，导致钛合金构件内应力极大容易在内应力作用下在焊缝区形成裂纹，因此需要采用合适的焊接工艺避免焊缝的裂纹产生是钛合金电子束焊面临的主要问题。另外，电子束焊需要在真空室或气氛室内进行，因此会限制钛合金工件的尺寸和形状。

激光焊：与电子束焊一样，具有很高的能量密度，所以容易实现焊缝宽度小、变形少、不添加焊接材料的高精度焊接，而且可在大气中作业，也没有磁场造成的不稳定问题。鉴于以上优点，激光焊已经广泛应用在几乎所有金属的焊接过程中。激光焊在钛合金焊接方面的应用也取得了较为成功的效果。对于钛合金的焊接，它是具有较大熔深的优点，因为钛金属具有较低的热传导率和较高的吸收红外线光的能力。如果具有较小的焊接热影响区，焊件变形会很小。特别是在大厚度钛合金结构的焊接中，激光焊具有更加明显的优势，但激光焊也有其自身的缺陷，就是容易造成气孔，因此激光焊接时需要注意焊缝接口形式，焊接参数及保护环境的选择等问题。

等离子弧焊：是利用等离子枪将阴极和阳极间的自由电弧压缩成高温、高电离度、高能量密度及高焰流速度的电弧，可用于焊接、喷涂、堆焊及切割。等离子弧焊接有两种基本方法：小孔型等离子弧焊及熔透型等离子弧焊，其中30A以下的熔透型等离子弧又称为微束等离子弧焊。小孔型等离子弧焊可用于焊接厚板，熔透型等离子弧主要用在焊接

薄板。等离子弧焊一般使用氩气中添加 5%~7% 氢气的混合气体来提高电弧的收缩性,但在焊钛及钛合金时,为了避免产生钛的氢化物,使用纯氩气或氦与氩的混合气。小孔型等离子弧焊是一个很有潜力的焊接方法,具有较高的生产率,与钨极惰性气体保护电弧焊比较,工作方法类似,但是降低了气孔的产生,因此已经被应用到大厚板钛合金结构的焊接中。

钎焊:钎焊也是钛合金结构的一种连接方法,主要应用在钛合金复杂结构的制造中,如蜂窝结构,小型航空精密部件等。目前钛合金的钎焊主要采用真空钎焊方法进行,采用的钎料可以用银基钎料、铝基钎料和钛基钎料,其中银基钎料和铝基钎料的润湿性良好,但力学性能和化学成分与母材相比较差,钛基钎料与钛合金冶金相容性较好,具有较高的接头强度,因此是钛合金真空钎焊的首选材料。

四、钛及钛合金焊接技术发展趋势

1. 钛及钛合金焊接技术现存的问题

钛合金的焊接由于开始的时间较晚,因此还有很多焊接问题没有解决,主要包括:

(1) 大厚板钛合金焊接的应力控制问题 大厚板材料的焊接应力问题一直是金属材料焊接的一个主要研究内容之一。由于在大厚板焊接过程中,经历热循环后,大厚板内部易形成三向应力,造成接头塑性、韧性的急剧下降。对于钛合金结构,由于存在导热系数较小且线膨胀系数较大的特点,因此其内部应力更加复杂,若选择焊接方法及工艺不当时会降低焊缝的性能。

(2) 大尺寸薄板钛合金焊接的变形及晶粒长大问题 由于钛合金弹性模量较小,因此在焊接过程中钛合金结构变形量较大,特别是在薄板结构中变形量表现的更加明显,严重影响焊接结构的使用性能,如铜箔钛阴极辊,对焊缝部位的变形及晶粒长大要求极高,而焊接由于经历了一个热循环,因此不可避免的会产生变形和晶粒长大,严重影响了焊接钛阴极辊的使用。

(3) 钛合金与异种金属的焊接问题 钛材与异种金属的连接主要体现在以下几个方面:当钛与其他金属的熔点相差很大时,易形成熔化不良;当钛

与其他金属线膨胀系数相差很大时,易导致焊缝区裂纹增多;当钛其他金属之间形成较多的金属间化合物时,由于金属间化合物具有很大的脆性,所以容易使焊缝产生裂纹,甚至断裂等。

2. 钛及钛合金结构及焊接技术的发展趋势

(1) 大厚板钛及钛合金结构的窄间隙焊接技术 钛及钛合金结构的优良性能使得钛及钛合金结构成为太空及深海探索结构的主要制造材料,大量的宇航工具,深海探测工具均不同程度的采用了大厚板钛合金结构,为了适应更加复杂的环境的探索,大厚板及超大厚板钛合金结构的应用会越来越多。因此对大厚板及超大厚板钛合金结构的焊接技术越来越高,包括对设备、工艺等方面的要求,特别是钛合金大厚板窄间隙焊接技术的研究对大厚板钛合金焊接具有重要意义。

(2) 大尺寸薄板钛及钛合金焊接无变形及晶粒控制技术 由于钛及钛合金弹性模量小,因此在内应力作用下变形量较大,特别是大尺寸薄板结构,变形对焊接结构的影响更加明显,因此目前已经有科学工作者在进行钛合金五变形焊接技术及晶粒控制技术的研究。该技术的突破不仅对钛合金结构焊接有重大意义,而且对其他金属结构的焊接也具有明显的指导意义。

(3) 钛合金与其他材料的焊接技术 由于钛合金的生物相容性,因此钛合金在生物领域得到广泛应用,但由于在生物不同部位对结构性能要求不同,对钛合金提出了与其他结构进行连接的要求,如钛合金与陶瓷的连接问题;此外在工业领域也存在大量的钛合金与铝合金,钛合金与不锈钢等的连接问题,因此其连接问题的研究将是一个热点。

五、结语

随着人类对大自然探索的不断深入,钛及钛合金等高性能金属的应用会越来越广泛,在超厚板结构、大尺度薄板结构、钛合金异种材料连接结构等方面的应用会越来越多,因此在钛及钛合金结构会遇到更多焊接问题需要解决。此外,新的焊接方法的不断出现对钛及钛合金的连接也提供了新的途径,因此在钛及钛合金的焊接方面还有难题亟待解决。MW (20121008)