

一种高性能钛合金支座结构的创新制造方案

A Novel Welding-based Manufacturing Approach for Complex Thick-walled TC4 Titanium Alloy Structures

供稿|李佩, 袁晓玲, 李斌, 赵欢, 黄洋, 梁飞艳 / LI Pei, YUAN Xiaoling, LI Bin, ZHAO Huan, HUANG Yang, LIANG Feiyan

内容导读

钛合金以其轻质、高强、耐腐蚀的优异性能,已成为海洋工程与高端装备的关键材料。本文以某水下设备用 TC4 钛合金支座为例,探讨了一种复杂厚壁结构件的焊接成形制造方案。与传统的铸造工艺相比,焊接成形能有效避免气孔等缺陷,在提升结构强度与可靠性的同时,兼具更好的经济性。文中系统梳理了该结构件制造过程中的核心挑战:如何控制焊接变形、保证全焊透焊缝质量,并满足严格的形位公差要求。通过选用手工钨极氩弧焊作为主要焊接方法,并配套设计了专用焊接工装、铜制保护罩及严格的焊接保护与清理流程,有效保障了焊缝质量。焊后采用整体热处理以消除残余应力,并通过定制化的机加工策略与表面钝化处理,最终确保了构件尺寸精度与长效耐腐蚀性。本研究为类似复杂钛合金结构件的制造提供了可靠的技术路径与实践参考。

Ti6Al4V (TC4) 钛合金在国内的研制生产始于 20 世纪 60 年代初期,现已广泛应用于航空航天领域,如航空发动机的风扇、压气机盘及叶片,以及飞机上的各种承力结构件(如梁、框、接头、紧固件)。TC4 钛合金在高温环境中的耐腐蚀性优异^[1-2],500 °C 以内氧化速度非常慢,尤其在海水、盐雾、酸性碱性环境中抗腐蚀能力极强。在海洋勘探和海洋工程中,钛合金以其耐腐蚀、高强度、低密度、无磁性等特性成为理想的海洋工程装备用材料,应用领域涉及核潜艇、深潜器、船舶推进器、冷却器、

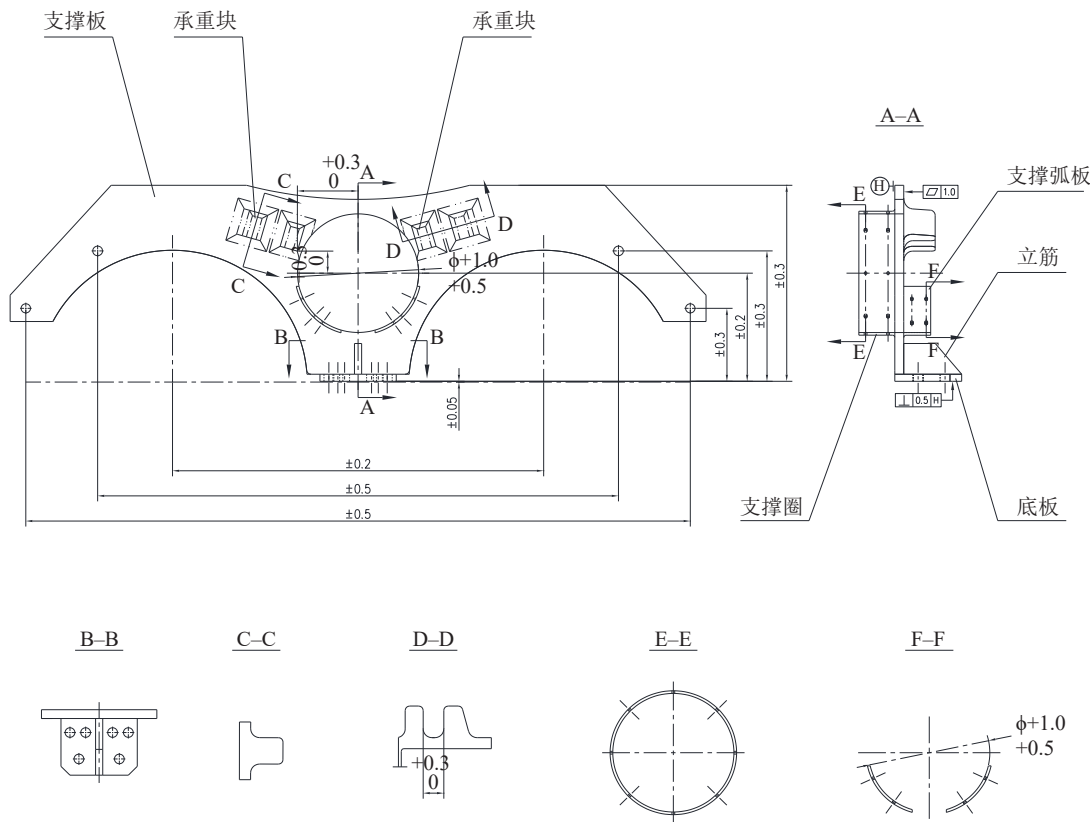
声呐导流罩、采矿车等,显著提高了海洋水下装备的性能和使用寿命。

本文涉及一种 TC4 钛合金结构件的加工制造,该结构件为某水下设备的支座,其主体厚度为 20 mm,质量为 55 kg,结构如图 1 所示。以往此类厚壁复杂钛合金结构件多采用铸造成形,但铸造材料的强度和韧性较低,且容易产生气孔等内部缺陷,难以满足高强度与高可靠性的需求。本文旨在探讨此类结构件的焊接制造工艺,采用常规板材焊接成形,经济性和强度可靠性相比铸造方案均有提

作者单位:宝钛装备制造(宝鸡)有限公司,陕西 宝鸡 721014

高。根据零件使用环境和强度要求,其材料需选用退火态 TC4 钛合金板材,并符合 GB/T 3621—2022

标准。该结构件形状复杂、壁厚较大,形位公差要求严格,且属于承重部件,所有焊缝均须实现全焊透。



注: 字母 A~E 为剖视图编号。

图 1 结构件简图 (单位: mm)

本文从工艺保证措施、焊接工艺方案、焊后检验几个方面探讨了此类焊接结构件的制造工艺路线,解决了焊接变形、焊缝质量保证、形位公差控制等技术难点,为此类设备的加工制造探索出了可行的方案。

工艺保证措施

制造环境

设备制造应在洁净厂房内进行,施焊环境需进行非绕咻试验;施工专用的场地应铺设橡胶或木板等材料,以避免碰伤、擦伤钛材表面。钛制零部件应设置专门存放区,禁止与钢制零部件混放;在整个施工过程中,应注意避免铁离子和粉尘等有害金属对钛材的污染,表面用清洁的覆盖物覆盖。同时应准备好经校平的适合设备尺寸的平台;工作场所

要保持清洁、干燥,严格控制灰尘,且通风良好。施工人员应衣着整洁,组装、焊接等工序施工人员应戴干净的手套;使用工卡具、加工设备应避免铁离子和其他污染。制造过程的各个环节应防止钛表面的铁离子污染。

工艺路线

此结构件主要由支撑板、承重块、支撑弧板和支撑圈组成,其制造工艺路线为:将各零件在平台上组对,点固焊;采取防变形措施并焊接成形;组件焊后进行消除应力热处理;最后精加工成型。各结构件的加工工艺如下:

支撑板加工工艺流程为:采用数控激光切割(按零件轮廓留出二次加工余量)→坡口制备→尺寸检测。承重块工艺流程为:采用数控激光切割(按零件轮廓留出二次加工余量)→尺寸检测;支

撑弧板的加工工艺流程为：采用数控激光切割（弧板厚度留出二次加工余量）→刨四边并加工坡口→卷弧成形→划线→钻孔→尺寸检测；支撑圈加工工艺流程：采用数控激光切割（支撑圈厚度留出二次加工余量）→刨四边并加工坡口→卷筒成形→纵缝焊接→矫圆→射线（RT）+超声（UT）+表面渗透（PT）检测→车内外径及直端坡口→划线→钻孔→尺寸检测。

焊接工艺方案

焊接方法选择

TC4 钛合金可采用的焊接方法有钨极氩弧焊、深熔氩弧焊、真空电子束焊、激光焊等。（1）钨极氩弧焊采用氩气有效隔绝焊接接头周围空气，且氩气不溶于金属，同时钨极电弧性质稳定，热源和填充焊丝可分别控制，填充焊丝不通过电流，易于控制焊接过程中的冶金反应，不产生飞溅，可获得高质量焊缝。在工艺得当情况下可实现单面焊双面成形，焊缝成形美观。缺点是钨极承载电流能力有限，熔敷速度较小，熔深较浅，生产率较低，且氩气成本较高。（2）深熔氩弧焊（K-TIG）兼具氩弧焊的高品质焊缝质量和清洁度，且热源能量密度高，电弧集中、穿透力强，中厚板焊接不需开坡口即可一次焊透，实现单面焊双面成形，焊接效率高，特别适合中厚板焊接。缺点是不适用于小型短焊缝及多位置焊接。（3）真空电子束焊具有焊接冶金质量好，焊缝窄，深宽比大，焊接角变形小，焊缝及热影响区晶粒细小，接头综合性能好，焊缝和热影响区无空气污染，焊接厚件时效率高等优点；缺点是焊缝中易出现气孔，结构尺寸受真空室限制，不适合大批量生产，焊接接头残余应力大，设备复杂昂贵，对接头加工、装配要求严格，电子束易受杂散电磁场干扰，且焊接时产生的 X 射线需要严加防护。（4）激光焊优点为环境适应性强，焊接质量高、效率高、变形小，不使用电极，清洁高效；缺点是易出现溢流、焊偏等缺陷，对装配精度要求高，操作难度大，设备成本高。

该结构件结构形状复杂，焊缝多为角焊缝且长度较短，厚度为中厚板。对焊缝性能、便捷性、可

操作性、经济性等多方面综合对比，选用手工钨极氩弧焊进行焊接。

焊接结构设计

焊接结构设计遵循以下原则：焊缝位置应相对构件截面的中性轴对称，避免过于集中；在保证强度的前提下，合理选择焊缝的长度、数量及尺寸。焊接坡口应在保证强度的前提下使焊缝截面尺寸尽可能小^[3-4]。承重块为重要承重件，要求其支撑板的焊缝必须焊透。由于承重块厚度较大，最薄处厚度为 40 mm，因此将其与支撑板的连接设计为插入式结构：按承重块形状尺寸在支撑板上加工通孔，坡口设置在支撑板上且沿支撑板壁厚对称，使承重块与支撑板的连接焊缝为对接缝，详见图 2、图 3。支撑圈与支撑弧板、支撑板的连接结构既要求焊透，又需保证支撑圈中心线与支撑板中心孔的同轴度，为此在支撑圈与支撑弧板的端部与支撑板组对一侧加工 4 mm 高的对中直台，直台外径与支撑板中心孔设置公差，保证间隙 <0.2 mm，详见图 4。底板与支撑板的连接结构见图 5。

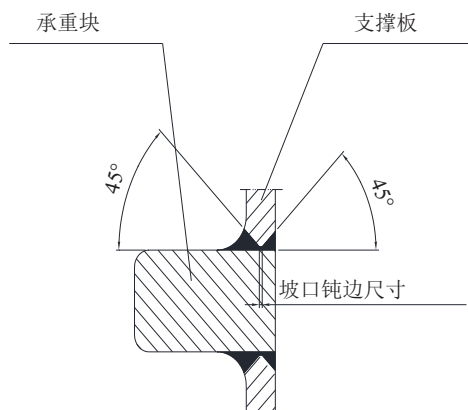


图 2 C-C 剖面承重块与支撑板焊接结构

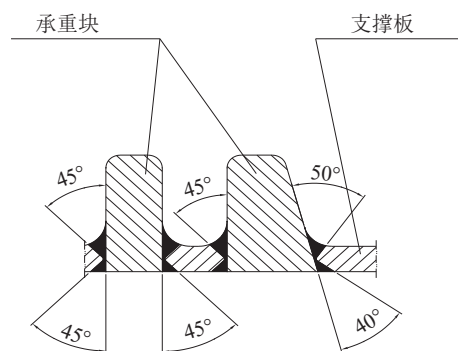


图 3 D-D 剖面承重块与支撑板焊接结构

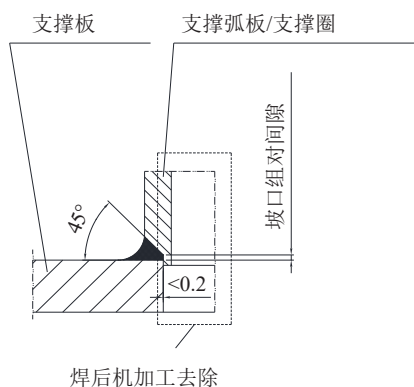


图4 支撑弧板/支撑圈与支撑板焊接结构

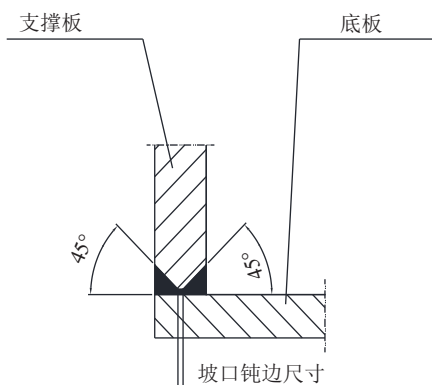


图5 底板与支撑板焊接结构

焊接清理及保护

由于钛的化学活性高，易被杂质和氧化物污染，导致焊接接头塑性、韧性显著降低甚至开裂，因此焊前应对距坡口 50 mm 范围内的母材表面进行修磨去除氧化层，并用乙醇清洗坡口及焊丝表面，去除油污及其他污染物。清洁工作及施焊过程应在清洁、干燥、控尘、无污染的隔离区域中进行。焊接环境出现下列任一情况时，必采取有效防护措施，否则禁止施焊：（1）气体保护焊时风速 $>1.5\text{ m/s}$ ；（2）相对湿度 $>80\%$ ；（3）无防雨、防雪措施的室外作业（雨天、雪天时）；（4）焊件温度低于 0°C 。

钛的焊接温度很高（可达 $1000\sim 1500^\circ\text{C}$ ），且其化学性质活泼，在焊接过程中易与氧、氢、氮发生反应。焊接时应采用合理的工艺，尽量选用小的焊接线能量，并严格控制层间温度 $\leq 100^\circ\text{C}$ ，焊接工艺参数见表 1。焊接过程中的保护至关重要，保护气体采用纯度为 99.99%、露点低于 -40°C 的氩气。为使焊缝得到充分保护，采用特制的铜保护罩（见图 6、图 7）对焊缝正面和背面进行保护；保护罩及焊枪均

内置冷却水管，将温度控制在 250°C 以下。焊后还需继续通氩气保护，直至焊缝完全冷却。焊接接头及母材力学性能见表 2。

表1 焊接工艺参数

焊接方法	焊材直径/mm	电流种类和极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)	气体流量/(L/min)
钨极氩弧焊	$\Phi 2.4$	直流正接	140~220	14~22	7~15	15



图6 对接焊缝焊接保护罩



图7 角焊缝焊接保护罩

焊接防变形措施

钛的线膨胀系数较大，弹性模量和塑性等比例系数较低，相对于钢材在焊接过程中更易产生变形，因此需要采取以下措施加以控制。（1）预热：钛的焊接开始前应进行 $400\sim 600^\circ\text{C}$ 的预热，以降低焊接过程中的温度梯度影响和残余应力作用，从而减少焊接变形。（2）固定：根据零件结构特点及变形预判，设计专用焊接工装夹具（见图 8）对零件进行强制固定，以减少焊接变形。（3）焊接顺序：采用合理的焊接顺序和方向，实施分段焊接以减少热量累积、加快散热，从而减小热变形。（4）温度控

表 2 焊接接头及母材力学性能

部位	力学性能 (20 °C)			弯曲试验结果 ($\alpha=180^\circ$, $D=160\text{ mm}$)	低倍检查
	抗拉强度/MPa	冲击性能/J	维氏硬度, HV		
母材	925	40	303	—	无裂纹、折叠、气孔、偏析、缩尾、金属或非金属夹杂及其他肉眼可见冶金缺陷
焊缝		57	32	无裂纹	根部已焊透, 无裂纹、气孔、未熔合等缺陷
熔合线		37	361	无裂纹	根部已焊透, 无裂纹、气孔、未熔合等缺陷
距熔合线2 mm	983	28	369	无裂纹	根部已焊透, 无裂纹、气孔、未熔合等缺陷
距熔合线5 mm		30	368	无裂纹	根部已焊透, 无裂纹、气孔、未熔合等缺陷

注: α 为弯曲角度, D 为弯曲直径。

制: 在施焊过程中对温度分布进行控制, 以降低温度梯度和焊接残余应力的影响, 从而减少焊接变形, 常用的措施有采用降温器、冷却水等。本次设备焊接量较小、结构较复杂, 采用在氩气保护罩内增设冷却循环水管的方式边焊接边冷却, 有效控制了焊接温度^[5]。



图 8 焊接与热处理工装

由于工件尺寸公差要求严格, 为满足使用要求并保证结构尺寸的稳定性, 在全部焊接完成后必须进行整体热处理, 以消除残余内应力, 使其形状和尺寸稳定, 并改善加工性能和使用性能。根据工件的结构尺寸要求、截面尺寸、工件材料的再结晶温度, 选择热处理温度为 (700~720) °C、保温时间为约 1 h, 热处理曲线见图 9。

焊后机加工

工件在焊后检测合格并经整体消应力热处理后

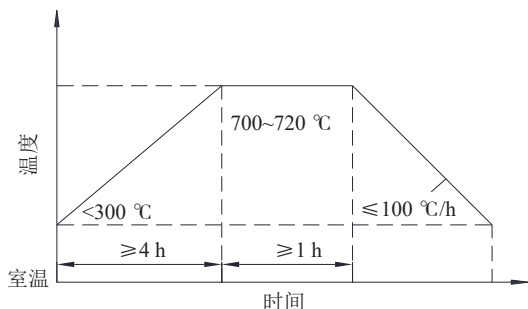


图 9 热处理曲线

进行机加工。TC4 钛合金的硬度较高、热导率低, 为避免刀具磨损和工件变形, 其机加工应使用硬质合金或涂层刀具, 并充分使用冷却液以降低切削温度。钛的弹性模量低, 约为低碳钢和不锈钢的 1/2, 即相同应力条件下, 钛工件的变形约为钢构件的 2 倍, 加工表面回弹明显, 这会增加切削不稳定性, 并加剧刀具磨损甚至导致崩刃。故 TC4 钛合金的机加工需综合考虑以上因素, 严格控制切削温度。应利用刀具侧刃散热空间大的优势, 尽量采用侧刃加工, 采用“小切宽、快进给”的策略, 并使用多刃刀具以提高效率。冷却液应充分覆盖切削刃, 以有效降低切削区域温度。同时, 加工参数不宜过高, 切削速度应控制在 20~50 m/min, 进给量控制在每转 0.1~0.2 mm。

根据其结构特点和公差要求, 设计加工流程如下: (1) 以机床台面为基准装夹找正: 先将支撑板面找正, 使之与机床台面平行, 装夹时需通过专用工装装夹定位, 禁止强力装夹; (2) 以机床台面为基准加工底板底面和底板上的孔成形; (3) 将已加工底板置于机床台面上并贴实, 以台面为基准加工支撑板各轮廓成形, 加工支撑圈和支撑弧板内外圆成形, 加工承重块轮廓尺寸成形, 加工支撑板上各孔成形; (4) 所有锐边倒钝, 去除毛刺。

表面处理

对钛合金表面进行酸洗钝化处理, 可使钛表面形成一层致密的氧化物薄膜, 有效隔绝介质的腐蚀, 显著提高钛合金的表面质量和耐用性, 延长使用寿命。故应先对结构件表面进行清洗和脱脂, 除去表面灰尘、杂质和油污, 然后再进行酸洗钝化处理, 以保证形成的钝化膜致密均匀。酸洗钝化后需

用清水冲洗，以去除残余酸液和杂质。

焊后检验

该工件焊缝类型包括对接焊缝和角焊缝。其中，承重块与支撑板的连接焊缝为主要承重结构，要求其内部无裂纹、气孔、夹渣等缺陷。因此，依据 NB/T 47013.2—2015《承压设备无损检测》对该焊缝进行 100% 射线检测，检测等级为 AB 级，质量等级要求为 I 级合格^[6]。所有焊缝表面进行 100% 渗透检测，检测结果为等级 C 级，I 级合格。

对工件表面酸洗处理后进行铁污染试验。试验采用蓝点法，无蓝点出现为合格。试验完成后，应将工件表面清洗干净。

结束语

通过制定合理的制造工艺方案，采用合理的焊接方法及工装，并规划对应的机加工方案和流程，保证了焊缝质量、形状尺寸及公差精度要求；通过加强各环节的质量控制、检验及验收，确保了制造质量符合产品要求。随着钛及其合金在轻量化及特殊环境等应用领域不断拓展，其替代传统材料（如碳钢、不锈钢等）的优势日益显著，钛及其合金型

材、结构件在海洋、化工、车辆、武器等工程领域的应用需求逐年增大。试制出此类钛合金结构件，并对其焊接、热处理、成型及无损检测等进行技术研究，为此类产品制造加工探索出了切实可行的加工方案。

参考文献

- [1] 曲家东，史大禹，戴山，等. 80% 轧制+680~750℃ 退火温度：热轧 TA5 钛合金板材最优组织和性能. 金属世界，2025(5)：40
- [2] 曲家东，张薇，高尚飞，等. TA10 钛合金性能调控的秘密：氧含量与退火温度如何决定材料“性格”？. 金属世界，2025(3)：69
- [3] 中国机械工程学会. 焊接手册. 2 版. 北京：机械工业出版社，2004
- [4] 周振丰，张文钺. 焊接冶金与金属焊接性. 北京：机械工业出版社，1988
- [5] 于启湛. 钛及其合金的焊接. 北京：机械工业出版社，2020
- [6] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. NB/T 47013.2—2015 承压设备无损检测 第 2 部分：射线检测. 北京：新华出版社，2015

作者简介：李佩，女，陕西省宝鸡人，工程师，2007 年毕业于西安建筑科技大学机械设计制造及自动化专业，主要研究方向：压力容器制造工艺。通信地址：陕西省宝鸡市钛城路 1 号宝钛工业园宝钛装备制造（宝鸡）有限公司；E-mail: 179577189@qq.com。