

钛合金焊接过程防氧化保护技术进展

樊立民¹, 耿乃涛², 杨 柳³, 武少杰¹, 程方杰^{1, 4*}

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350; 2. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102200; 3. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300; 4. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

摘 要: 钛及钛合金综合性能优异, 但由于高温活性强导致焊接氧化问题严重, 特别是在很低的固态温度下仍然吸收气体影响焊接接头质量, 因此需要严格的焊接保护措施。在分析了钛合金的氧化机理及特性的基础上, 系统总结了焊接过程中的各种防氧化保护措施和具体技术。详细介绍了钛合金长直焊缝、环形焊缝、空间不规则焊缝以及增材制造四种典型过程的防氧化保护问题, 主要的防护措施有保护拖罩、封闭式充氩环境以及强制冷却三大类。针对钛合金长直焊缝局部气体保护, 一般形式为保护拖罩结合背面保护气槽以及水冷措施; 对于环形焊缝的背面保护方式, 可以采用背面拖罩或者整体充氩保护的方法, 其正面保护采用弧形拖罩即可; 而不规则焊缝受限于空间形状, 焊接拖罩的方法不再适用, 小尺寸构件可采用简易充氩保护箱, 大尺寸构件保护问题亟待解决; 增材制造过程中的热积累问题也对其保护形式提出了更高的要求, 目前采用具有一定气体挺度的层流惰性气体和 CO₂ 跟随强制冷却的方式取得了较好的效果。

关键词: 钛合金; 焊接; 氧化; 局部保护

中图分类号: TF823, TG422

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)06-0043-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.06.005

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Progress of anti-oxidation protection technology in titanium alloy welding process

Fan Limin¹, Geng Naitao², Yang Liu³, Wu Shaojie¹, Cheng Fangjie^{1, 4*}

(1. School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China; 3. Chengdu Advanced Metal Materials Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China)

Abstract: Titanium and titanium alloys have excellent comprehensive properties, but the welding oxidation problem is serious due to the strong high-temperature activity. Especially the problem of absorbing gas at solid-state temperature is significant, which affects the quality of the welding joint. Therefore, strict welding protection measures are needed. Based on the analyses of oxidation mechanism and characteristics of titanium alloy, various anti-oxidation protection measures and specific technologies in welding process are summarized systematically in this paper. Anti-oxidation protection of titanium alloy in four typical processes of long straight weld, circular weld, space irregular weld and additive manufacturing is introduced in detail. The main protective measures include welding gas shielding trailing, closed argon-filled environment and forced cooling. For local gas protection of long straight weld of ti-

收稿日期: 2021-04-13

基金项目: 天津市科计划项目 (编号: 18ZXJMTG00140)。

作者简介: 樊立民 (1995—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 长期从事钛合金焊接工艺研究, E-mail: 1165286830@qq.com;

* 通讯作者: 程方杰, 博士, 教授, E-mail: chfj@tju.edu.cn。

tanium alloy, the general form is welding gas shielding trailing combined with back protective gas groove and water cooling measures. For the back protection of the circular weld, the back gas shielding or the whole argon filled protection method can be adopted, and the front protection can use the welding gas shielding trailing. However, due to the limitation of the shape of the irregular weld, the method of welding gas shielding trailing is no longer applicable. The simple argon-filled protective box can be used for small size components, while the protection problem of large size components needs to be solved urgently. The heat accumulation in the additive manufacturing process also increases requirements for its protection form. At present, good results have been achieved by the laminar inert gas and followed by forced CO₂ cooling process.

Key words: titanium alloy, welding, oxidation, local shielding

0 引言

钛合金除了密度小以外,还具有高比强度、耐高温和抗腐蚀等优异的综合性能,广泛应用于航空航天、机械、生物、能源、医疗器械等众多领域^[1-2]。随着钛及钛合金应用范围的不断扩大,其焊接问题也变得日益突出。

钛及钛合金高温活性较强,250℃开始吸氢,400℃开始吸氧,600℃开始吸氮。在焊接过程中如果保护措施不当,焊缝会吸收这些有害气体导致接头脆化。其中氧气的影响最为严重,故必须对400℃以上的焊接区域采取适当的保护措施^[3-5]。除真空电子束焊接(EBW)以外,其他的钛合金焊接方法都难以避开焊接保护问题^[6]。一些学者探索了类似于真空电子束焊接的整体保护方式^[7],但空间局限性导致其应用范围较窄,应用更为广泛的是各种形式的局部气体保护方式,结构紧凑且空间灵活性较好。

国内外学者针对钛合金的氧化机理,焊接氧化问题及其保护措施等相关问题展开了系列的研究,笔者从钛合金的氧化机理出发,对钛合金焊接的局部气体保护方式进行综述。

1 钛合金焊接氧化问题

钛合金从400℃开始吸收氧气,并且随着温度的上升吸收能力增强,生成一系列的氧化产物,使得未被氧化污染的银白色焊缝依次被氧化为淡黄色、蓝紫色、灰红色和灰黑色,导致焊接接头变脆,性能下降。

一般钛合金焊接时存在着两种氧化,即液态氧化和固态氧化。液态氧化是指焊接熔池的液态熔融金属受大气介质的污染而产生的氧化;固态氧化是指400℃以上高温已凝固的钛合金焊缝金属产生

的氧化^[8]。相比液态氧化而言,固态氧化对接头性能的影响要小得多,但仍然会明显降低接头塑性。由于实际焊接中熔池区域受到惰性气体的良好保护,故仅讨论钛合金高温焊缝的固态氧化问题。

针对钛合金的焊接氧化问题,国内六一二研究所^[9]研究了TA3钛合金不同氧化程度下的氧化产物及力学性能。表1列出了未被氧化污染的接头经过不同温度的保温处理后的接头颜色和弯曲角。可以看出随着氧化程度的加剧,焊接接头塑性下降,焊缝颜色依次呈现黄、紫、蓝、灰红、最后是不同程度的灰白色。北京航空材料研究院^[8]对TC4钛合金进行了不同温度下的炉中氧化试验,采用X射线光电子能谱(XPS)分析其氧化膜的成分及化学价态。钛合金发生氧化后呈现的不同颜色的氧化膜是由钛的多种氧化物组成的,其中TiO为金黄色、Ti₂O₃为蓝色,TiO₂为白色。随着氧化温度的升高,氧化层成分发生变化,即不同颜色氧化物所占比重发生变化,从而导致氧化层颜色呈现相应的变化。

表1 固态氧化试验结果^[9]
Table 1 Results of solid oxidation experiment

加热温度/℃	保温时间/min	接头颜色	弯曲角/(°)	
			测量值	平均值
400	30	黄	100 ~ 129	113
500	30	紫	90 ~ 112	97
600	30	蓝	102 ~ 110	106
700	30	灰红	94 ~ 116	107
800	30	灰白(浅)	88 ~ 118	99
900	30	灰白(深)	87 ~ 109	104

贾志强^[10]等研究了不同温度氧化处理2h对TC21钛合金氧化色的影响,并分析了氧化处理后试样的力学性能及微观组织。结果表明随着氧化温度的上升,除颜色呈一定规律性变化外,TC21钛合金

各力学性能均下降。600 ℃ 氧化处理后试样呈宝蓝色, 氧化温度超过 600 ℃ 后试样力学性能不再满足使用要求, 因此可将 600 ℃ 温度作为材料性能是否满足要求的拐点温度, 宝蓝色作为实际观察时对材料性能的简单判断依据。目前工程上一般可通过目

测焊缝颜色并与钛合金氧化色标进行对比, 来判断焊缝被杂质气体污染的程度, 对于被污染的焊缝, 应按照表 2 中的措施进行相应的处理^[11]。由此可见, 固态下的氧化不仅仅影响表面层, 而且对整个接头性能都可能产生不利的影响。

表 2 钛焊缝表面不同氧化颜色的情况对比^[11]
Table 2 Comparison of different oxidation colors on titanium weld surface

焊缝表面颜色	污染程度	对接头质量影响	处理措施
银白色	几乎不存在有害气体的污染	无影响	
浅黄、金黄色	轻微污染	对接头机械性能影响不大	
淡蓝	一般性污染	略有影响	不锈钢丝轮刷除
紫蓝、深蓝色	污染较严重	接头弯曲角下降	去除焊道及邻近金属, 重新焊接
灰色或黄色粉末	严重污染	焊接区脆化	完全去除焊道和热影响区, 检查保护、供气系统, 试验测试后重新焊接

2 钛合金焊接局部保护方式

邹帅^[12]对近年来钛合金焊接气体保护技术的专利进行分析, 并将目前主要的保护途径分为以下几类: 改变喷嘴结构、加入拖罩、使用真空箱或惰性气体箱、调整保护气体种类和含量、焊缝正反面气体保护。整体保护焊接设备复杂, 成本较高, 且对工件尺寸有较大限制, 因此在对焊缝要求不高的情况下, 尤其是在焊接长直焊缝或者环焊缝等较为规则的焊缝时, 保证焊缝周围被氩气保护即可。整体充氩保护应用范围非常窄, 下面主要针对不同结构形式的局部保护方式进行论述。

2.1 长直焊缝

针对简单的平板对接类的长直焊缝, 一般采用焊接保护拖罩即可实现对钛合金正面焊缝和热影响区的有效保护。为防止背面氧化, 通常还需要搭配背面充氩保护和强制冷却等辅助措施。这样的局部保护方式结构紧凑, 使用方便, 保护效果良好。

保护拖罩一般应满足以下要求: 在一定长度和宽度范围内隔绝高温焊缝和热影响区与空气的接触; 拖罩内部应形成稳定的层流保护气体, 避免因为紊流卷入空气。

保护拖罩的典型结构如图 1^[13-16]所示。氩气通过送气软管和横置的气体分布管首先送入保护罩的上部腔室; 在铜网气筛的作用下, 均匀地进入下部腔室形成自上向下的稳定气流并形成有效的保护。

焊接拖罩的结构设计时应注意以下要点。首先, 气筛到焊缝表面的距离要适当, 一般不小于 8 mm, 距离过小时从上部腔室流出的气体还未形成稳定层

流即到达焊缝表面, 距离过大时容易产生紊流, 因此距离过小或过大均不能起到较好的保护效果; 第二, 保护罩结构边缘处尽量圆滑过渡不留死角, 保证氩气完全置换保护罩内的空气; 第三, 交接处要做好密封, 防止在细小的缝隙内流速过大形成紊流卷入空气^[17-18]。

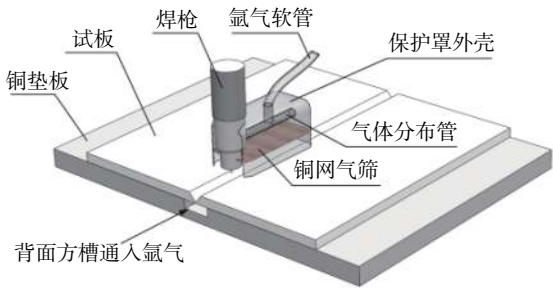


图 1 长直焊缝焊接保护装置示意
Fig. 1 Schematic of long-straight welding seam shielding device

保护罩的尺寸参数设计应根据不同焊接工艺下的高温区间长度而定。主要影响因素为焊接方法的能量密度和板厚等, 可采用仿真软件模拟出该种钛合金焊接工艺的温度场, 计算出合理的保护罩尺寸, 但应以最终的焊接保护效果为准^[19]。以下为拖罩技术尺寸范围: 长 40 ~ 100 mm, 宽 30 ~ 60 mm, 根据板厚及热输入合理选择拖罩尺寸; 氩气由进气软管进入分布管, 分布管用 $\varnothing 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的不锈钢管制成, 管上钻有上下两排直径 0.8 ~ 1.0 mm 的小孔, 孔距 8 ~ 10 mm; 铜网气筛采用单层或者多层孔径为 74 μm 左右的铜网构成^[19]。

针对钛合金长直焊缝的背面保护问题, 一般采

用开方形槽的铜垫板的方式来解决。通过向方槽中持续通入氩气来防止背面焊缝氧化。根据开设方槽体积大小来设定提前送气时间,另外方槽两端应放置挡块来形成密室效应,减少气体的消耗量同时降低空气混入的可能。在中厚板多层焊接或热输入较大的情况下,为避免热积累,铜衬垫内还可以通入循环水进行辅助水冷。

2.2 环型焊缝

在进行钛合金管-管/管-板对接以及一些筒体和球体等旋转构件焊接时都涉及到一类环形焊缝的保护问题。外部正面焊缝的保护一般是采用一种弧形的拖罩结构,与长直焊缝的拖罩类似,如图2^[20]所示。拖罩与被焊工件表面要贴合良好,间隙不能太小(旋转过程中容易卡住)也不能太大(保护气侧漏)。

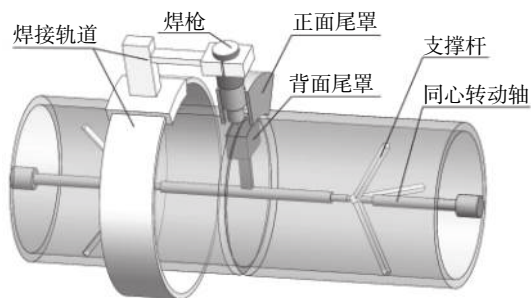


图2 环缝焊接同步式背面拖罩保护示意

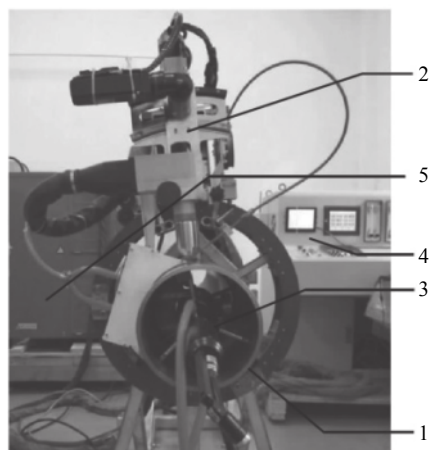
Fig. 2 Schematic of synchronous backside trailing shields for circular welding

背面的保护方式有几种形式,需要根据管径和实际工况来进行合理选择。首先,如图3^[21]所示的大口径短管环缝焊接时,内表面可以采用与外面类似的弧形拖罩进行保护。此时根据管子是否转动,内表面的保护拖罩分为固定式和同步转动式两种。固定式结构较为简单,仅需通过支撑结构固定于熔池及高温焊缝附近对其进行背面保护;同步转动式则需要同步控制系统保证拖罩与外部焊枪保持同步运动,实现全位置的正面和背面保护,结构如图2所示。第二,当管径较小或者是密闭结构的焊接时,背面保护一般都采用直接内部整体充氩气进行保护。该背面保护方式不需要专门的拖罩,结构简单。缺点是气体消耗量较大,一般都需要提前通气置换内部的空气,因此内部空间越大,置换效果越差,保护气体的纯度也就越低,保护效果也就越差。

下面是几个具体的实际工程案例。

广东省焊接技术研究所^[21]设计了一种全位置焊缝背面观察及气体保护装置如图3所示,该装置

包括背面保护气罩、观察摄像头以及主体运动装置。摄像头拍摄的画面实时显示在液晶监视器上,实现焊前对保护位置的定位,以及焊接过程中观察背面焊缝成形情况的功能。



1-剖分式轨道装置;2-焊接小车行走机构;3-背面保护及观察装置;4-等离子弧焊接设备;5-控制系统

图3 管道全位置等离子弧自动焊接设备

Fig. 3 Structure of full-position plasma arc automatic welding equipment

采用该全位置 PAW 自动焊接设备对 $\varnothing 219 \text{ mm} \times 8.8 \text{ mm}$ TC4 钛合金管道进行焊接试验,在合适的保护气流量下,焊缝表面及背面均呈银白色,无氧化情况^[22]。

西安飞机工业集团^[23]给出了 $\varnothing 114.3 \text{ mm}$ 直径的钛合金管对接焊缝背面同步拖罩保护的气体规范。首先提前通 $10 \sim 15 \text{ L/min}$ 的氩气 $3 \sim 5 \text{ min}$,焊接时氩气流量可降低至 10 L/min ,为防止管内气压过大导致焊穿或者影响背面成形,当焊接至起始焊缝约 $30 \sim 40 \text{ mm}$ 时,氩气流量应降至 2 L/min 以下。实际焊接时应根据管径等参数确定,并根据实际焊接保护效果来优化。

背面同步拖罩设备较为复杂,并且通用性较差,仅适用于管道对接环焊缝。其它类型的空间曲线焊缝,如钛合金管相贯焊缝,以及体积相对较小的封闭空间结构的焊接,难以实现背面拖罩跟随焊缝的同步运动。因此灵活性较强的封闭式充氩的背面保护方式,在实际生产中更为常见,钛合金管对接焊缝封闭式充氩保护装置如图4^[24]所示,一定流量的氩气经进气管流入气体分布管,经均匀小孔的气筛作用后形成层流保护气,密封胶带配合密封圈形成相对密封环境,密封胶带随焊随揭,有利于较低流量下保持较高氩气纯度。

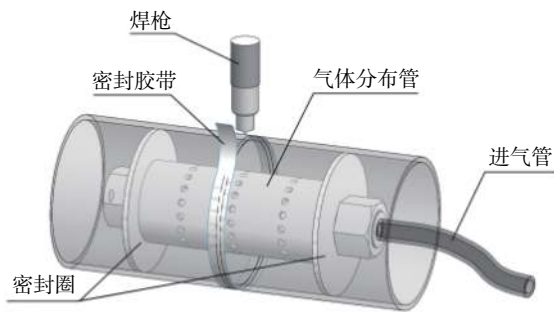


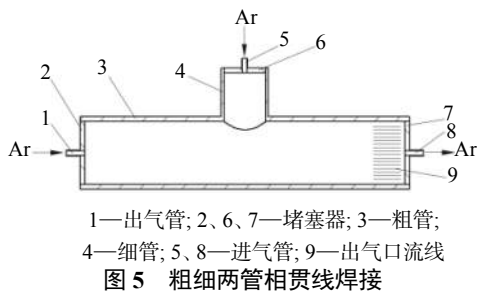
图4 环缝焊接封闭式充氩保护示意

Fig. 4 Schematic of closed Ar-filled trailing shields for circular welding

2.3 不规则焊缝

针对钛合金的不规则焊缝,其背面焊缝一般采用充氩保护方式,而正面焊缝无法采用拖罩保护,并且也没有其他合适的保护方式。针对背面焊缝充氩保护,由于不规则焊缝的焊接构件一般不是轴对称结构,要设计较好的分散气流的装置十分复杂。因此通常其充氩方式更加简便,仅由密封装置和进出气口组成即可,但也容易导致内部充气不均降低保护效果。针对其正面焊缝保护,小尺寸构件可以通过简易整体充氩保护箱进行整体保护,大尺寸不规则构件的焊接保护仍是一个难题,没有通用的有效解决办法。

对于钛合金管的相贯焊接背面保护,西安飞机工业集团^[23]对飞机钛合金导管焊接保护进行了研究,采用了图5^[23]的方式对钛合金粗细两管相贯线接头焊接进行保护,焊后焊缝内表面呈现银白色光泽,无氧化,达到检验标准。



1—出气管; 2、6、7—堵塞器; 3—粗管;
4—细管; 5、8—进气管; 9—出气流线

图5 粗细两管相贯线焊接
Fig. 5 Intersecting line welding of two different diameter pipes

由于没有内部分散和平均气流的装置,因此这类充氩保护方式应当合理安排进出气口,以及通气时间和流量以及顺序。总原则为使背面焊缝处于尽可能高纯度的惰性气体氛围,气体流量过小容易导致焊缝保护不足产生氧化,流量过大容易导致气压过大而影响焊缝背面成形。

司松社^[25]对某机大型钛合金支撑环组件进行

焊接保护研究,其结构如图6^[25]所示,该支撑环组件由两个机加工件对接焊接而成,两侧各有一排螺纹孔,焊后形成封闭腔体结构。材料为Ti230钛铜合金,两条焊缝周长各3000 mm多,焊接处厚度2.4 mm。针对焊接背面保护问题,利用其封闭腔体结构的特点,两侧各留一孔分别作为氩气进气孔和出气孔,其余孔均用高温胶布密封,在封闭的腔体内形成氩气保护环境,可以防止钛合金背面焊缝被氧化污染。

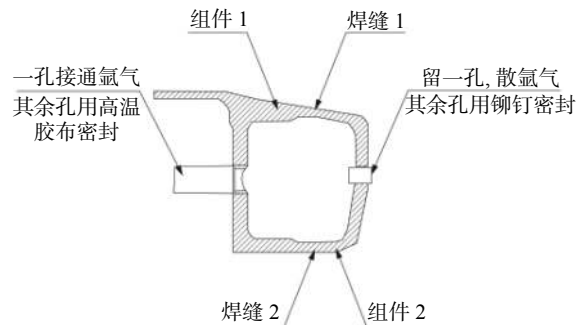


图6 支撑环组件背面保护示意

Fig. 6 Schematic of back protection of support ring component

2.4 增材制造中的气体保护

由于钛合金熔点高,导热性差,焊接时接头在高温区间停留时间长,合金元素在 β 相中的扩散系数大,因此高温 β 相极易晶粒过热粗化,产生“ β 脆性”。这导致钛合金对电弧增材制造过程中的热积累问题十分敏感。并且由于增材制造过程是采用逐层堆积的方式,因此板材焊接时背面开方槽通氩气结合水冷,以及管道焊接时内部持续通入氩气这两种保护和冷却方式均不再适用。一些学者针对钛合金增材制造过程中的新型拖罩保护和强制冷却进行了研究。

Bermingham^[26]等研究了电弧增材制造过程中TC4钛合金氧化的敏感性问题,对比分析了图7^[26]所示C1~C5五种不同拖罩保护条件下的增材试样的氧化程度。其中,C1为理想保护状态,即喷嘴末端与气筛层重合,熔敷金属距多孔板离5 mm,增材试样冷却至室温后的外观光滑,呈银白色金属光泽;C2为轻微氧化保护状态,即熔敷金属距离多孔板10 mm,试样冷却至室温后表面出现蓝绿色氧化层;C3为较差保护状态,即熔敷金属距离多孔板10 mm,且移除拖罩底部挡板,试样冷却至室温后表面出现棕色氧化层;C4为极差保护状态,层间不再打磨氧化层,其他条件与C3相同,试样冷却至室温后表面

出现少量棕色易脱落氧化层; C5 为无保护状态, 即不使用焊接拖罩, 样冷却至室温后表面出现大量棕色易脱落氧化层。可以看出增材制造过程中随着保护条件的恶化, 增材试样氧化程度加剧, 与传统焊接形式下的氧化规律相同。

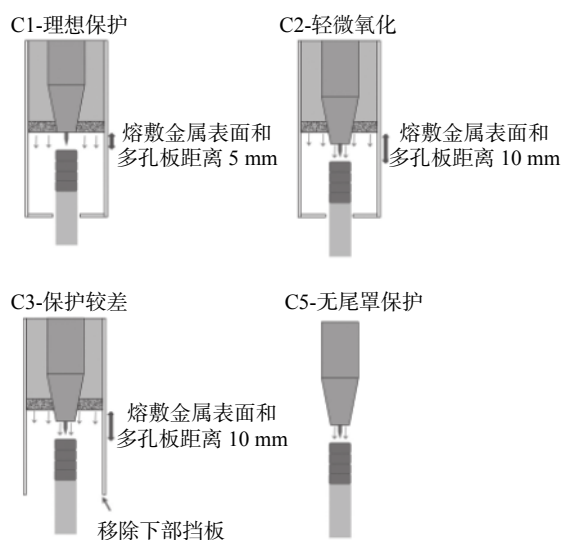


图 7 不同拖罩保护条件示意

Fig. 7 Schematics of the different trailing shield configurations

目前增材制造过程中一般为单壁墙结构, 采用传统拖罩结构进行保护时, 随着熔敷层数的增加, 保护气拖罩高度随着焊枪上升而不断增加, 其下沿无法与基板贴合形成半封闭式结构, 导致焊接保护过程中极易卷入空气。

Ding 等^[27] 研制了一种基于层流的新型拖罩气体保护装置, 与传统拖罩相比, 该拖罩主要改进结构在于中间采用蜂窝状结构作为气体层流限制结构。其原理为通过降低侧壁处气体流速来减少紊流的发生, 并且长径比大于 8 的情况下具有较好的层流效果。在蜂窝结构出口处速度分布见图 8^[27], 最终经过金属网筛后形成速度均一的层流。当拖罩下沿与增材试样顶部距离为 5.0 mm 时, 可使得增材试样顶部 30 mm 高度范围内的氧含量低于 0.2%, 与传

统拖罩相比改善了 3 个数量级左右^[27]。

Wu^[28-30] 等人对 Ti6Al4V 合金的非熔化极电弧增材制造提出了采用 CO₂ 强制冷却熔敷金属的抗氧化方案, 试验装置如图 9^[28] 所示。通过在保护拖罩后部再附加一个 CO₂ 喷嘴, 熔敷完一层焊缝金属后电弧熄灭焊枪仍继续运动, 熄弧的同时迅速开启 CO₂ 喷嘴开关, 使得 CO₂ 气流对熔敷层金属进行逐步冷却。并与自然冷却条件下层间温度分别为 100、200、300 °C 的增材试样的表面氧化情况进行了对比, 如图 10^[28] 所示。结果表明, 采用 CO₂ 强制冷却显著降低了钛合金电弧增材制造过程中的表面氧化现象, 还有利于细化组织和提高力学性能。

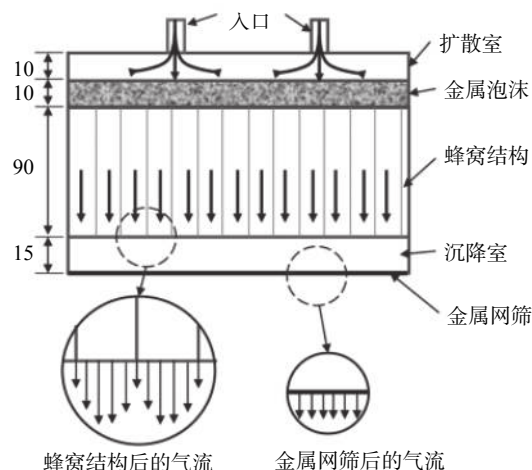


图 8 层流局部保护装置设计

Fig. 8 Laminar flow local shielding device design

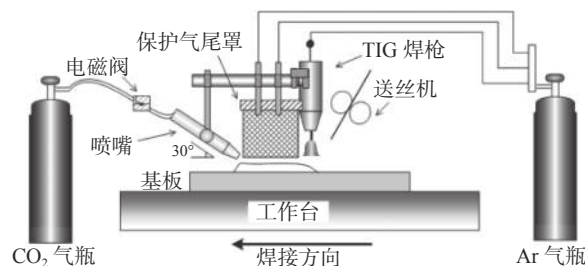
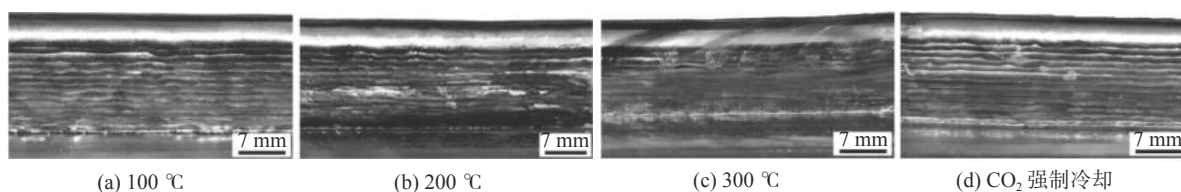


图 9 采用层间强制冷却措施的非熔化极电弧增材制造系统示意

Fig. 9 Schematic diagram of the GT-WAAM deposition system with forced interpass cooling



(a) 100 °C

(b) 200 °C

(c) 300 °C

(d) CO₂ 强制冷却

图 10 Ti6Al4V 增材试样的表面外观

Fig. 10 The surface appearance of Ti6Al4V parts fabricated at different conditions

3 总结

钛合金高温活性强,400℃开始吸收氧气且随温度上升吸收程度加剧,钛合金焊接时极易发生氧化污染,接头性能恶化。钛合金焊缝随氧化程度上升,其表面呈现一系列的颜色变化,焊缝的颜色是评价保护效果的有效判断依据。

针对钛合金长直焊缝局部气体保护,一般形式为保护拖罩结合背面保护气槽以及水冷措施。与钛合金长直焊缝相比,环形焊缝在背面保护方式上有较大区别,可以采用背面拖罩或者整体充氩保护的方法,正面保护采用弧形拖罩即可。而不规则焊缝受限于空间形状,其背面保护只能采用整体充氩保护的方法,正面保护也无法采用常见的拖罩形式;针对小尺寸构件尚可通过简易的整体充氩保护箱来进行保护,而大尺寸构件的正面保护问题仍亟待解决。

钛合金增材制造是近年来的研究热点。而增材制造由于逐层累积高度逐渐增加的特点,传统拖罩和背保护的方式不再适用;并且增材制造过程中的热积累问题也对其保护形式提出了更高的要求。目前采用具有一定气体挺度的层流惰性气体和CO₂跟随强制冷却的方式取得了较好的效果。

目前的科研工作和实际生产中应用最多的保护

形式仍为结构简单的焊接拖罩,对于常见的较为规则的焊缝形式,如板材对接或角接时的长直焊缝,管材对接时的环形焊缝,采用合适的焊接拖罩即可对焊缝进行有效的保护。针对结构复杂的空间焊缝形式,若附加焊接拖罩不会影响正常焊接作业,且对焊缝质量要求不是特别严格的情况下,仍可采用焊接拖罩进行保护,但会减弱焊缝保护效果,适用于对焊缝质量要求不是特别严格的场景下使用。而对于焊缝质量要求极为严格的空间复杂焊缝,目前只能采用整体保护形式,保护效果较好,但是设备较为复杂。

针对局部保护形式中各种形式的焊接拖罩,其内部结构基本相似,尺寸参数设计应根据不同焊接工艺下的高温区间长度而定,但实际应用中大多通过经验所得。因此为了提高设计效率,可通过热输入和板厚等关键参数建立高温区间的近似计算模型,或者采用仿真软件模拟钛合金焊接的温度场,得到需要进行保护的高温区间范围,进而计算出合理的保护罩尺寸,但应以最终的焊接保护效果为准。

针对整体保护形式,一般为密闭的充氩舱室结构,对小尺寸的空间复杂结构件确实有良好的保护效果,但其设备较为复杂,并且对体积巨大的整体钛合金结构件同样难以适用,因此大尺寸构件的保护问题仍亟待解决。

参考文献

- [1] Li Xingyu, Li Fang, Mou Gang, *et al.* Welding of titanium and titanium alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(4): 67-70.
(李兴宇, 李芳, 牟刚, 等. 钛及钛合金的焊接[J]. *电焊机*, 2017, 47(4): 67-70.)
- [2] Cui C, Hu B, Zhao L, *et al.* Titanium alloy production technology, market prospects and industry development[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3): 1684-1691.
- [3] Choi B H, Choi B K. The effect of welding conditions according to mechanical properties of pure titanium[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 201(1): 526-530.
- [4] Costa A, Miranda R, Quintino L, *et al.* Analysis of beam material interaction in welding of titanium with fiber lasers[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2007, 22(7): 798-803.
- [5] Liu Shunhong, Peng Shande, Xiang Fan. Research on laser lap welding of TC4 titanium alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2006, (6): 24-29.
(刘顺洪, 彭善德, 项凡. TC4钛合金激光搭接焊的研究[J]. *电焊机*, 2006, (6): 24-29.)
- [6] Chen Sijie, Zhu Chunli. Research on advanced connecting technology of titanium and titanium alloy[J]. *Hot Working Process*, 2015, 44(3): 18-21.
(陈思杰, 朱春莉. 钛及钛合金先进连接技术研究[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(3): 18-21.)
- [7] Chen Guangfeng, Guo Fenyong. Development and application of inert gas integral protective welding equipment[J]. *Welding*, 2000, (9): 20-22.
(陈光锋, 郭奋颖. 惰性气体整体保护焊接设备的研制及应用[J]. *焊接*, 2000, (9): 20-22.)
- [8] Luo Hui, Hao Liping, Wei Zuwei. Study on oxidation properties of titanium alloys [C]//The 9th National Welding Conference. Tianjing: Welding Branch of China Society of Mechanical Engineering, 1999.
(罗辉, 郝丽萍, 魏祚伟. 钛合金氧化性能研究[C]//第九次全国焊接会议. 天津: 中国机械工程学会焊接分会, 1999.)
- [9] Room 23, 621 Research Institute. Research on welding oxidation of titanium alloy[J]. *Aviation Technology*, 1997, (7): 3-7.
(六二一研究所二十三室. 钛合金焊接氧化问题的研究[J]. *航空工艺技术*, 1997, (7): 3-7.)
- [10] Jia Zhiqiang, Zeng Weidong, Zhang Yaowu, *et al.* Effect of oxidation treatment on oxidation color and mechanical properties

- of TC21 titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(1): 49–53.
(贾志强, 曾卫东, 张尧武, 等. 氧化处理对TC21钛合金氧化色及力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(1): 49–53.)
- [11] Ting Wang. Welding problems and countermeasures of marine titanium and titanium alloy[J]. *Ship Science and Technology*, 2011, 33(6): 113–116.
(汀汪. 船用钛及钛合金的焊接问题及对策[J]. *舰船科学技术*, 2011, 33(6): 113–116.)
- [12] Zou Shuai. Patent analysis of gas protection technology for titanium alloy welding[J]. *Chemical Industry Management*, 2018, (19): 23–25.
(邹帅. 钛合金焊接气体保护技术的专利分析[J]. *化工管理*, 2018, (19): 23–25.)
- [13] Zhang Yong, Yang Jianguo, Liu Xuesong, *et al.* Design of jet protection welding tooling for TIG welding of thin plate[J]. *Welding & Joining*, 2009, (10): 46–49.
(张勇, 杨建国, 刘雪松, 等. TC4薄板TIG焊喷嘴保护焊接工装的设计[J]. *焊接*, 2009, (10): 46–49.)
- [14] Shi J, Song G, Chi J. Effect of active gas on weld appearance and performance in laser-TIG hybrid welded titanium alloy[J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, 1: 47–53.
- [15] Bendikiene R, Baskutis S, Baskutiene J, *et al.* Comparative study of TIG welded commercially pure titanium[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 36: 155–163.
- [16] Hu Xukun, Ma Anguo, Zhang Pengfei, *et al.* Improvement and application of inert gas protection devices for welding zirconium alloy plates[J]. *Metal World*, 2019, (4): 64–66.
(胡旭坤, 马安国, 张鹏飞, 等. 锆合金板材焊接惰性气体保护装置的改进和应用[J]. *金属世界*, 2019, (4): 64–66.)
- [17] Shi Fangle, Huang Lei. Design of Ti and Ti-alloy tube TIG arc welding protective cover[J]. *Mechanical and Electrical Equipment*, 2019, 36(1): 36–38.
(施方乐, 黄雷. 钛及钛合金管氩弧焊焊接保护罩设计[J]. *机电设备*, 2019, 36(1): 36–38.)
- [18] Yang Qinghua. Improve the welding quality of titanium tube with self-made argon-filled protective cover[J]. *Install*, 2002, (1): 20–21.
(杨庆华. 利用自制充氩保护罩提高钛管焊接质量[J]. *安装*, 2002, (1): 20–21.)
- [19] Bin Gao, Deng Qilin, Zhou Chunyan. Research on gas protection in laser welding of titanium alloy[J]. *Electrical Machining and Die*, 2009, (5): 44–49.
(宾高, 邓琦林, 周春燕. 钛合金激光焊接过程中气体保护问题的研究[J]. *电加工与模具*, 2009, (5): 44–49.)
- [20] Liu Boyan. Research on welding seam forming and microstructure performance by full-position plasma arc welding of titanium alloy pipeline [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
(刘帛炎. 钛合金管道全位置等离子弧焊焊缝成形及组织性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.)
- [21] Guo Chunfu, Liu Boyan, Sun Weiqiang, *et al.* All-position plasma arc automatic welding equipment for pipelines[J]. *Research and Application of Materials*, 2017, 11: 251–255.
(郭春富, 刘帛炎, 孙伟强, 等. 管道全位置等离子弧自动焊接设备[J]. *材料研究与应用*, 2017, 11: 251–255.)
- [22] Guo Chunfu, Liu Boyan, Dong Chunlin, *et al.* TC4 Full-position PAW technology and joint performance analysis[J]. *Journal of Welding*, 2019, 40: 121–126.
(郭春富, 刘帛炎, 董春林, 等. TC4厚壁管全位置PAW工艺及接头性能分析[J]. *焊接学报*, 2019, 40: 121–126.)
- [23] Li Xiaoshu. Research on titanium alloy pipe welding protection [C]//The Second North China Welding Academic Conference. Xi'an: Welding Branch of China Society of Mechanical Engineering, 2001.
(李小书. 钛合金导管焊接保护研究[C]//第二届中国北方焊接学术会议. 西安: 中国机械工程学会焊接分会, 2001.)
- [24] Zhang Junling, Shi Xiaogang, Wang Xiaoyun. Argon shielding for welding of high alloy stainless steel and heat resisting steel tube[J]. *Petrochemical Equipment*, 2012, 41: 70–72.
(张俊玲, 石小刚, 王孝云. 高合金不锈钢和耐热钢管焊接氩气保护罩[J]. *石油化工设备*, 2012, 41: 70–72.)
- [25] Si Songshe. Research on anti-surface oxidation technology of titanium alloy fusion welding joint of a machine [C]//The Annual Academic Conference of The Aviation Society of China. Shenzhen: The Aviation Society of China, 2007.
(司松社. 某机钛合金熔焊缝防表面氧化工艺研究[C]//中国航空学会学术年会. 深圳: 中国航空学会, 2007.)
- [26] Bermingham M J, Thomson-larkins J, St John D H, *et al.* Sensitivity of Ti-6Al-4V components to oxidation during out of chamber wire+arc additive manufacturing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 29–37.
- [27] Ding J, Colegrove P, Martina F, *et al.* Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 226: 99–105.
- [28] Wu B, Pan Z, Ding D, *et al.* The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 97–105.
- [29] Wu B, Pan Z, Chen G, *et al.* Mitigation of thermal distortion in wire arc additively manufactured Ti6Al4V part using active interpass cooling[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24: 484–494.
- [30] Ding Donghong, Pan Zengxi, Qiu Zhijun, *et al.* Wire arc additive manufacturing of Ti6Al4V using active interpass cooling[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, 35(7): 845–851.