

焊接新技术新工艺 实用指导手册

技术资料·方法设备·材料·结构·计算·
检验与质量管理

主 编：王文其

HANJIE XINJISHU XINGONGYI SHIYONG ZHIDAO SHOUCHE

黑龙江文化电子音像出版社

焊接新技术新工艺实用 指导手册

——技术资料·方法设备·材料·结构·计算·
检验与质量管理

主编 王文其

✻ 四卷 ✻



黑龙江文化电子音像出版社



目 录



第 四 卷

第九篇 金属材料的焊接

第九章 钛及钛合金的焊接	(1451)
第一节 概述	(1451)
第二节 钛及钛合金的焊接特点	(1456)
第三节 钛及钛合金焊接工艺	(1457)
第十章 异种金属的焊接	(1468)
第一节 概述	(1468)
第二节 异种钢的焊接	(1477)
第三节 异种有色金属焊接	(1487)
第四节 钢与有色金属的焊接	(1492)
第五节 复合钢板的焊接	(1496)
第十一章 金属材料的堆焊	(1502)
第一节 概述	(1502)
第二节 堆焊金属的使用性能	(1504)
第三节 堆焊金属的类型及其特性	(1507)
第四节 堆焊方法与工艺	(1512)
第一节 概述	(1527)
第二节 热喷涂方法及设备	(1529)
第三节 喷涂材料	(1540)
第四节 热喷涂工艺	(1549)
第五节 喷涂层性能检测简介	(1556)
第六节 热喷涂涂层的应用	(1557)



第七节 喷涂安全与防护 (1559)

第十篇 焊接结构

第一章 焊接应力与变形	(1563)
第一节 概述	(1563)
第二节 焊接应力	(1567)
第三节 焊接变形	(1575)
第二章 焊接接头	(1586)
第一节 概述	(1586)
第二节 常用焊接接头的工作特性	(1590)
第三节 焊接接头构造的设计与选择	(1598)
第四节 熔焊接头的静载强度计算	(1606)
第五节 电阻点焊和缝焊接头的静载强度计算	(1619)
第六节 焊缝符号及其标注方法	(1622)
第三章 焊接结构的破坏	(1623)
第一节 概述	(1623)
第二节 焊接结构的脆性破坏	(1632)
第三节 焊接结构的疲劳破坏	(1655)
第四节 焊接结构的蠕变断裂	(1682)
第五节 焊接结构的腐蚀破坏	(1687)
第四章 焊接结构设计	(1698)
第一节 概述	(1698)
第二节 结构设计要点	(1705)
第三节 结构设计中的细部处理	(1721)
第四节 设计评审	(1732)

第十一篇 焊接结构生产

第一章 焊接工艺过程设计	(1737)
第一节 焊接工艺概述	(1737)



第二节	焊接工艺过程分析	(1741)
第三节	工艺规程的编制	(1748)
第二章	焊接工艺评定	(1762)
第一节	概述	(1762)
第二节	焊接工艺评定的一般程序	(1763)
第三节	焊接工艺评定规则	(1769)
第四节	焊接工艺评定方法	(1776)
第三章	焊接机械装备及其设计	(1787)
第一节	概述	(1787)
第二节	装配—焊接夹具	(1791)
第三节	焊接变位机械	(1828)
第四节	焊接辅助机械装置	(1848)
第四章	焊接生产的机械化和自动化	(1857)
第一节	概述	(1857)
第二节	焊接自动机	(1857)
第三节	焊接中心	(1859)
第四节	焊接生产线	(1861)
第五节	焊接机器人	(1865)

第十二篇 焊接检验

第一章	概述	(1881)
第一节	焊接检验的作用与意义	(1881)
第二节	产品质量检验的依据	(1881)
第三节	产品质量检验方式	(1882)
第四节	焊接检验方法及其分类	(1884)
第五节	焊接缺欠及其分类	(1884)
第二章	焊接接头质量要求及其缺欠分级	(1895)
第一节	钢结构焊缝外形尺寸要求	(1895)
第二节	钢熔化焊接头缺欠分级	(1897)
第三章	破坏性检验	(1899)
第一节	焊缝金属及焊接接头力学性能试验	(1899)
第二节	焊接金相检验	(1900)



第三节	断口分析	(1901)
第四节	化学分析与试验	(1903)
第四章	非破坏性检验	(1905)
第一节	外观检验	(1905)
第二节	压力试验	(1906)
第三节	致密性检验	(1907)
第五章	无损探伤	(1908)
第一节	超声波探伤	(1908)
第二节	射线探伤	(1918)
第三节	磁粉探伤	(1928)
第四节	渗透探伤	(1934)
第五节	涡流探伤	(1938)
第六节	无损检验方法的比较与选择	(1939)



第九章 钛及钛合金的焊接

第一节 概 述

钛及钛合金具有很多优良性能,是航空、航天工业的重要结构材料。在石油、化工和船舶工业中也越来越多地得到应用。

一、钛的基本特性

(1) 物理特性

纯钛呈银白色,是有色金属。比重小,归轻金属类。表9-9-1列出了它与几种常用金属物理性能的比较。从表中看出,钛的突出特点是熔点高、导热性差、线膨胀系数小,密度比铁低,电阻率大。

表9-9-1 钛与几种常用金属物理性能比较

性 能	Ti	Fe	Cu	Al
密度(20℃)/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	4.5	718	8.9	2.7
熔点/℃	1668	1579	1083	660
比热容(0~500℃)/ $\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$	0.54	0.46	0.38	0.89
热导率(20℃)/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	15	67.4	384	200.8
电阻率(20℃)/ $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$	42.1	9.7	1.72	2.68
线膨胀系数(0~100℃)/ 10^{-6}K^{-1}	8.2	11.9	16.5	24.3
弹性模量/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-2}$	109.2	196	120	71.1

(2) 化学性能

钛化学性质活泼,与氧有很强的亲和力,室温下清洁表面也会迅速形成稳定而坚韧的氧化膜。由于氧化膜的保护作用,钛及钛合金在海水及大多数酸、碱、盐的介质中具有优良的耐蚀性能。所以在化学工业和造船工业中得到应用。

钛的化学活性随温度升高而增强,在高温下其表面氧化层厚度增加,温度高于648℃



时,钛的抗氧化能力急剧下降。

钛在固态下能吸收气体,加热至 300℃ 时,就开始吸收氢,加热至 400℃ 起吸收氧,在 600℃ 时起吸收氮。钝钛中含有这些气体元素其强度显著提高,而塑性急剧下降,所以氧、氮、氢是钛的有害杂质。

(3) 力学性能

纯钛的塑性、韧性很好,特别低温韧性非常好。在 550℃ 时其性能仍保持不变,具有很好的热稳定性。

纯钛的抗拉强度不高,但可以加入合金元素进行强化。经合金强化而得的钛合金,具有比钢和铝都大的比强度(抗拉强度,密度),见表 9-9-2。比强度是评价航空及航天工业用材的一个重要指标,所以钛合金在航空、航天工业中被广泛采用。

表 9-9-2 工业合金的比强度

合金材料	抗拉强度 σ_b /MPa	密度 ρ /g·cm ⁻³	σ_b/ρ (比强度)
铝合金	490 ~ 588	2.7	181 ~ 218
镁合金	245 ~ 274	1.9	129 ~ 144
超高强度钢	1274 ~ 1470	7.8	163 ~ 188
钛合金	980 ~ 1372	4.5	218 ~ 305

(4) 物理冶金特性

钛在 885℃ 以下具有密排六方晶体结构,称 α 钛;高于 885℃ 将发生同素异构转变,成为体心立方晶体结构,称 β 钛。随着钛中合金元素及杂质含量不同,同素异构转变温度也不同。根据对钛的同素异构转变温度的影响,可把常用的合金元素分为三类:

第一类是 α 稳定元素,它们能提高 α 钛的稳定性。随着其含量增加, $\beta \rightleftharpoons \alpha$ 转变温度升高, α 相区扩大。铝属于这一类元素。铝以置换方式固溶于钛中,使钛强化。它是各种钛合金中都含有的基本合金元素,质量分数最高达 7%。氧、氮、碳也是 α 稳定元素,它们以间隙方式固溶于钛中,在强化钛的同时,又导致显著脆化,故属有害杂质元素,其含量要严格限制。

第二类是 β 稳定元素,它们能提高 β 钛的稳定性。随着其含量增加, $\beta \rightleftharpoons \alpha$ 转变温度降低, β 相区扩大。在这类元素中有一些在 β 钛中无限固溶,而在 α 钛中却有限固溶,如 V 和 Mo 等。它们和钛形成置换固溶,可以使强度提高而不显著降低塑性;另一些元素在 β 钛和 α 钛中均为有限固溶,并发生共析转变,生成化合物,如 Co、Cr、Mn、Fe、Cu、Si 等。它们都和钛形成置换固溶,前面四种元素使共析转变迟缓,在通常冷却速度下,共析转变不可能发生。而后两种 Cu、Si 使共析转变迅速进行。氢也属 β 稳定元素,以间隙方式溶入钛中,并促进共析转变。它以片状或针状氢化钛(TiH_2)析出能引起严重的脆化,故属有害杂质。

第三类是中性元素,它们在 α 钛和 β 钛中都能无限固溶,对 $\beta \rightleftharpoons \alpha$ 转变温度影响不大,但对钛能起强化作用,如 Sn、Zr 和 Hf 等。



二、钛及钛合金的种类与性能

钛及钛合金分类有多种方法。按生产工艺特性分有变形、铸造和粉末冶金三大类,目前工业上应用最广的是变形钛和钛合金。

按照钛的同素异构体或退火组织可分为 α 型、 β 型和 $\alpha + \beta$ 型三类钛和钛合金。国家标准分别用“TA”代表 α 型、“TB”代表 β 型、“TC”代表 $\alpha + \beta$ 型钛及钛合金的牌号类型,在其后用阿拉伯数字代表合金号数。在 α 型钛中按杂质或合金元素又细分为碘法钛(TAD)、工业纯钛(TA1、TA2、TA3)和 α 钛合金(TA4~TA8)三种。

表9-9-3为钛及钛合金的牌号,化学成分;表9-9-4为室温下的力学性能。

(1) 工业纯钛

为不含合金元素的 α 钛,不能通过热处理强化。共有TA1、TA2和TA3三个牌号,它们之间的区别在于氧、氮、碳、氢等杂质含量不同,按牌号尾数依次杂质增多,强度也依次增加,而塑性则依次下降(见表9-9-4)。工业纯钛常温强度较低,但塑性、韧性,特别低温冲击韧度很好,而且有优良的耐蚀性能,很适用于工作在 350°C 以下强度要求不高的耐蚀场合。又由于焊接性能良好,在石油、化工、船舶等工业上被广为应用,也常被用作其他钛合金焊接的填充金属。工业纯钛一般只在退火状态下焊接而不在冷作硬化状态下焊接。

工业纯钛的屈服点和抗拉强度偏低,为了提高强度获得更高的比强度,在工业纯钛的基础上有目的地加入不同种类和数量的合金元素,就发展了以下所述的各种高强度钛合金。

(2) α 钛合金

是含有 α 稳定元素铝和中性强化元素锡等的钛合金。铝以置换固溶形式存在于 α 钛中。这类合金利用生成固溶体达到强化目的,热处理不能强化。冷作硬化略能提高强度,但会导致塑性降低。铝能提高同素异构转变温度扩大 α 相区范围,增大 α 相的稳定性。铝除提高耐热性能和力学性能外,还能扩大氢在钛中的溶解度,减少形成氢脆敏感性的作用。铝不宜加入过多,否则会出现 Ti_3Al 而脆化,一般 $w(\text{Al}) < 7\%$ 。氮、氧、碳也属 α 稳定元素,也能使 α 钛强化,但塑性严重下降而变脆。

TA7钛合金中加入 $w(\text{Sn}) = 2\% \sim 3\%$ 的锡,用以提高合金的常温强度和热强性,具有较高抗蠕变能力。此外,低温冲击韧度、压力加工性能及焊接性能良好。

α 钛合金只能进行低温退火,目的是消除冷作硬化的影响和焊接应力。

所以, α 钛合金具有优良的热稳定性、蠕变强度、组织稳定性、低温力学性能和焊接性能。

(3) β 钛合金

这类钛合金含有高比例的 β 稳定化元素如Mo和V等, $\beta \rightleftharpoons \alpha$ 的转变进行很缓慢,在



表 9-9-3 钛及钛合金的化学成分 (摘自 GB/T 3620.1—1994)

牌号	化学成分组	主要化学成分 (%)										杂质 (%) ≤																
		Ti	Al	Cr	Mo	Sn	Mn	V	Fe	Cu	Si	B	Fe	Si	C	N	H	O										
TA1	工业纯钛	基	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	—	0.10	0.03	0.015	0.20	
TA2	工业纯钛	基	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	—	0.10	0.05	0.015	0.25	
TA3	工业纯钛	基	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.40	—	0.10	0.05	0.015	0.30	
TA4	Ti-3Al	基	2.0 ~3.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	—	0.10	0.05	0.015	0.15	
TA5	Ti-4Al-0.005B	基	3.3 ~4.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	—	0.10	0.04	0.015	0.15	
TA6	Ti-5Al	基	4.0 ~5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	—	0.10	0.05	0.015	0.15	
TA7	Ti-5Al-2.5Sn	基	4.0 ~6.0	—	—	—	—	2.0 ~3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.50	—	0.10	0.05	0.015	0.20	
TC1	Ti-2Al-1.5Mn	基	1.0 ~2.5	—	—	—	—	—	0.7 ~2.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	—	0.10	0.05	0.012	0.15	
TC2	Ti-4Al-1.5Mn	基	3.5 ~5.0	—	—	—	—	—	0.8 ~2.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	—	0.10	0.05	0.012	0.15	
TC3	Ti-5Al-4V	基	4.5 ~6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	—	0.10	0.05	0.015	0.15	
TC4	Ti-6Al-4V	基	5.5 ~6.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	—	0.10	0.05	0.015	0.20	
TC6	Ti-6Al-1.5Cr-2.5Mo-0.5Fe-0.3Si	基	5.5 ~7.0	0.8 ~2.3	2.0 ~3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.05	0.015	0.18
TC7	Ti-6Al-0.6Cr-0.4Fe-0.4Si-0.01B	基	5.0 ~6.5	0.4 ~0.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.05	0.025	0.30
TC9	Ti-6.5Al-3.5Mo-2.5Sn-0.3Si	基	5.8 ~6.8	—	2.8 ~3.8	1.8 ~2.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.40	—	0.10	0.05	0.015	0.15
TC10	Ti-6Al-6V-2Sn-0.5Cu-0.5Fe	基	5.5 ~6.5	—	—	—	—	1.5 ~2.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.10	0.04	0.015	0.20
TB2	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	基	2.5 ~3.5	7.5 ~8.5	4.7 ~5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	—	0.05	0.04	0.015	0.15	



一般的工艺条件下,其组织几乎全为 β 相。通过时效热处理, β 钛合金强度增高,这主要是因 α 相或化合物沉淀而强化。

β 钛合金在单一相条件下加工性能良好,具有优良的加工硬化特性;其缺点是低温脆性大,焊接性能差。

表 9-9-4 钛及钛合金板材的室温力学性能 (GB/T 3621—1994)

合金系和类型	牌号	主要成分	δ /mm	σ_1 /MPa	δ_5 (%)	α (°)	热处理
工业纯钛 (α 型)	TA ₁		0.3~2.0	370~530	40	140	退火
			2.1~10.0		30	130	
	TA ₂		0.3~2.0	440~620	30	100	退火
			2.1~10.0		25	90	
	TA ₃		0.3~2.0	540~720	25	90	退火
			2.1~10.0		20	80	
钛铝合金 (α 型)	TA ₆	Ti-5Al	0.8~1.5	685	20	50	退火
			1.6~2.0		15	40	
			2.1~10.0		12	40	
钛铝锡合金 (α 型)	TA ₇	Ti-5Al-2.5Sn	1.0~1.5	735~930	20	50	退火
			1.6~2.0		15	50	
			2.1~10.0		12	40	
钛铝锰合金 ($\alpha+\beta$ 型)	TC ₁	Ti-2Al-1.5Mn	0.5~1.0	590~735	25	90	退火
			1.1~2.0		25	70	
			2.1~10.0		20	60	
	TC ₂	Ti-3Al-1.5Mn	1.0~2.0	685	15	60	退火
			2.1~10.0		12	50	
钛铝钒合金 ($\alpha+\beta$ 型)	TC ₄	Ti-6Al-4V	0.8~2.0	895	12	35	退火
			2.1~10.0		10	30	
	TC ₁₀	Ti-6Al-6V-2Sn-0.5Cu-0.5Fe	1.0~4.0	1058	10	25	退火
	TC ₃	Ti-5Al-4V	1.0~2.0	880	12	35	退火
			2.1~10.0		10	30	
钛铝钼铬合金 (β 型)	TB ₂	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	1.0~3.5	≤980	20	120	淬火
				1320	8	—	淬火+时效

(4) $\alpha+\beta$ 钛合金

这类钛合金的组织是由 α 钛为基的固溶体和 β 钛为基的固溶体两相组织构成。其特点是:①可以通过热处理强化获得高强度;②耐热性高,热稳定性好;③当 α 相比比例高时,加工性能变差,而当 β 相比比例高时,则焊接性能变差。

$\alpha+\beta$ 钛合金在退火状态时断裂韧度高,在淬火-时效热处理状态下比强度大,故其力学性能可在较宽范围内变化。

$\alpha+\beta$ 钛合金的典型牌号是TC4(即Ti-6Al-4V),其综合性能良好,焊接性在 $\alpha+\beta$



钛合金中属最好,是航空、航天工业中应用最多的一种钛合金。

第二节 钛及钛合金的焊接特点

(1) 易受气体等杂质污染而脆化

常温下钛及钛合金比较稳定,与氧生成致密的氧化膜具有高的耐腐性能。但在540℃以上高温生成的氧化膜则不致密,随着温度升高,容易被空气、水分、油脂等污染,吸收氧、氮、氢、碳等,降低焊接接头的塑性和韧性。在熔化状态下尤其严重。因此,焊接时对熔池及温度超过400℃的焊缝和热影响(包括熔池背面)都要加以妥善保护。

在焊接工业纯钛时,为了保证焊缝质量,一般认为焊缝最高允许 $w(O) = 0.15\%$, $w(N_2) = 0.05\%$, $w(H_2) < 0.015\%$, $w(C) < 0.1\%$ 。焊接钛合金时,杂质的有害影响与工业纯钛具有基本相同的规律,对杂质的控制均应小于国家现行技术条件(见表9-9-2)规定钛合金母材的杂质含量。

(2) 焊接接头晶粒易粗化

由于钛的熔点高、热容量大,导热性差,焊缝及近缝区容易产生晶粒长大,引起塑性和断裂韧度降低。因此,焊接时对焊接热输入要严格控制,一般宜用小电流,快速焊。

(3) 焊缝有形成气孔倾向

气孔是较为常见的缺陷。形成的因素很多,也很复杂, O_2 、 N_2 、 H_2 、 CO 和 H_2O 都可能引起气孔。但一般认为氢气是引起气孔的主要原因,气孔多集中在熔合线附近,有时也发生在焊缝中心线附近。氢在钛中的溶解度随温度升高而降低,在凝固温度处有跃变。熔池中部比熔池边缘温度高,故熔池中部的氢易向熔池边缘扩散富集。

防止焊缝气孔的关键是杜绝有害气体的一切来源。防止焊接区被污染。

(4) 易形成冷裂纹

由于钛及钛合金中硫、磷、碳等杂质很少,低熔点共晶难在晶界出现,而且结晶温度区窄和焊缝凝固时收缩量小等,所以很少会产生热裂纹。但是,焊接钛及钛合金时极易受到氧、氢、氮等杂质污染,当这些杂质含量较高时,焊缝和热影响性能变脆,在焊接应力作用下易产生冷裂纹。其中氢是产生冷裂纹的主要原因。氢从高温熔池向较低温度的热影响扩散,当该区氢富集到一定程度将从固溶体中析出 TiH_2 ,使之脆化;随着 TiH_2 析出将产生较大的体积变化而引起较大的内应力。这些因素,促使冷裂纹的生成,而且具有延迟性质。

防止钛和钛合金焊接裂纹的措施,主要是避免氢的有害作用,减少和消除焊接应力。



第三节 钛及钛合金焊接工艺

钛及钛合金性质非常活泼,与氧、氮、氢的亲合力大,普通焊条电弧焊、气焊及 CO_2 气体保护焊都不适用于钛及钛合金的焊接。应用最多的是惰性气体保护焊。近年来,等离子弧焊、真空电子束焊、电阻焊、钎焊和扩散焊都有应用。

一、钨极氩弧焊(TIG)

最适用于厚度在 3mm 以下的钛及钛合金焊接。分敞开式焊接和箱内焊接两种类型,它们又各自分为手工焊和自动焊。敞开式焊接即在大气环境下的普通钨极氩弧焊,是利用焊枪喷嘴、拖罩和背面保护装置通以适当流量的氩气或氩氮混合气体,把焊接高温区与空气隔开,以防止空气侵入而沾污焊接区的金属,这是一种局部气体保护焊接方法。当焊件结构复杂,难以实现拖罩或背面保护时,则宜采用箱内焊接。箱体(或操作室)焊前先抽真空,然后充氩气或氩氮混合气体,焊件在箱体内处于惰性气氛下施焊,属整体的气体保护。

(1) 焊前准备

1) 接头型式和尺寸 选择接头型式应在有利于气体保护和保证焊接质量前提下尽可能减少焊缝层数和填充金属量。像搭接接头因其背面保护困难,而且接头受力条件差,尽可能不用,一般也不采用永久性垫板对接。

母材厚度小于 2.5mm 的 I 形坡口对接接头可不加填充焊丝进行焊接。

更厚的母材,则需开坡口并加填充金属。尽量地采用平焊位置施焊。用机械方法加工坡口,接头的装配要求,必须比焊接其他金属的高,因为接头内可能截留空气。

表 9-9-5 为钛及钛合金电弧焊的典型接头形式和尺寸。

2) 焊前清理 钛及钛合金的焊接质量很大程度上取决于对母材和填充焊丝焊前清理。

① 去氧化皮 焊前经轧制、锻造、模锻或非保护气氛热处理的工件,其表面在 600°C 以上形成的氧化皮较厚,往往需采用喷丸、喷砂等机械方法去除。然后再进行酸洗。

表 9-9-5 钛及钛合金电弧焊用的典型焊接接头形式和尺寸

接头坡口形式	厚度 δ/mm	坡口角度($^\circ$)	根部间隙/mm	钝边/mm
I 形	0.25~2.3	—	0	—
	0.8~3.2	—	0~0.15	—



接头坡口形式	厚度 δ /mm	坡口角度($^{\circ}$)	根部间隙/mm	钝边/mm
V 形	1.6 ~ 6.4	30 ~ 60	0 ~ 0.18	0.10 ~ 0.25 δ
	3.0 ~ 13	30 ~ 90		
X 形	6.4 ~ 38	30 ~ 90		
U 形	6.4 ~ 25	15 ~ 30		
双 U 形	19 ~ 51	15 ~ 30		

②表面酸洗 表面酸洗是去除表面氧化膜,用于钛和钛合金的酸洗液有多种配方,其中一种是硝酸 40%、氢氟酸 20%、水 58%,在室温下浸泡 15 ~ 20min,然后用水冲洗干净并烘干。

对于焊丝酸洗后一般须经真空脱氢处理。临焊前对焊丝和焊接坡口及其附近应再用丙酮或酒精擦洗脱脂。凡经清理后的焊件和焊丝必须在 4h 内焊完,否则需重新清理。

3)气体保护措施 基于钛及钛合金对空气中的氧、氮、氢等气体具有强的亲和力,必须确保焊接熔池及温度超过 400 $^{\circ}$ C 的热影响区(包括正、反面)与空气隔绝。表 9-9-6 列出了氩弧焊接钛及钛合金的两类气体保护措施及其适用范围。

平薄板对接用局部保护焊时,焊枪喷嘴直径宜用得大些,一般取 16 ~ 18mm,喷嘴到工件距离应小些。为提高保护效果和保证焊炬的可达性,可采用双层气体保护的焊炬;对于稍厚的焊件常采用带尾拖罩焊枪,焊缝背面都用气体保护垫板进行保护。图 9-9-1a 示出了拖罩和背面气保护的示意图。拖罩的尺寸按焊件厚度来确定,一般宽度为 25 ~ 60mm,手工焊时长度取 40 ~ 100mm;自动焊时长度取 60 ~ 200mm。罩内筛网或多孔板到焊件距离约 8mm 左右,若过大,则保护效果不好。若过小,则拖罩过热。自动焊时,常用流动水冷却的拖罩。背面气保护垫板一般用纯铜制造,铜垫板上开有成形槽,槽内有通气孔,孔径 1.0mm,孔距 10mm;槽的深度在 1mm 左右,宽度 2 ~ 8mm 之间。

管子对接、T 形接头和角接头焊接时的局部气体保护可以采用如图 9-9-1b、c、d 所示的装置。

表 9-9-6 氩弧焊焊接钛及钛合金的保护措施

类别	保护位置	保护措施	用途及特点
局部保护	熔池及其周围	采用保护效果好的圆柱形或椭圆形喷嘴,相应增加氩气流量	适用于焊缝形状规则、结构简单的焊件,灵活性大,操作方便
	温度 $\geq 400^{\circ}$ C 的焊缝及热影响区	1)附加保护罩或双层喷嘴 2)焊缝两侧吹氩 3)适应焊件形状的各种限制氩气流动的挡板	
	温度 $\geq 400^{\circ}$ C 的焊缝背面及热影响区	1)通氩垫板或焊件内腔充氩 2)局部通氩 3)紧靠金属板	



类别	保护位置	保护措施	用途及特点
充氩箱保护	整个工件	1) 柔性箱体(尼龙薄膜、橡胶等),不抽真空用多次充氩,提高箱内氩气纯度,焊接时仍需喷嘴保护 2) 刚性箱体或柔性箱体带附加刚性罩,抽真空($10^{-2} \sim 10^{-4}$ 托)再充氩	适用于结构形状复杂的焊件,焊接可达性较差
增强冷却	焊缝及热影响区	1) 冷却块(通水或不通水) 2) 用适应焊件形状的工装导热 3) 减小热输入	配合其他保护措施以增强保护效果

箱内焊接用的箱体分刚性和柔性两种,前者多用不锈钢制造,后者可用橡胶、透明塑料等制造。刚性焊接箱用前先抽真空到 1.3×10^{-2} Pa,然后充氩气或氩-氮混合气体,借助箱体上手套孔口,在箱内进行操作焊接。在焊接过程中需不断向箱内输送保护气体,以保持箱内为正压。这时焊枪可以不送保护气,也不用拖罩,但需水冷却。柔性焊接箱可用抽真空法或多次折叠法排除箱内空气,然后通入保护气体,通常排气不易彻底,常需通入流量较大的保护气体,把空气吹走,以保证焊接所需保护气的纯度。这时的焊枪仍需输送保护气体。

焊接时,评定氩气保护效果的最简单方法是用肉眼观察焊后焊缝及热影响表面上的颜色。一般银白色的保护优良,几乎不存在有害气体的污染;淡黄色、金黄色焊缝对力学性能影响不大;紫蓝色、深蓝色,表示已被有害气体污染,在静载、低压结构中是允许的。如果表面呈灰黑色、灰色、灰白色,表示保护不好已被严重污染。这样的接头已变脆,不能使用。

(2) 焊接工艺要点

1) 焊接材料 焊接钛及钛合金用的氩气纯度必须 $\geq 99.99\%$ 。焊接过程当氩气瓶压力降至 1MPa 时应停止使用。

填充焊丝一般是采用与母材同质的材料。为改善接头的塑性,可以采用比母材合金化程度稍低的焊丝,例如焊接 TC4 时可用 TC3 焊丝。当焊缝金属的塑性比强度更重要时,可用工业纯钛或强度较低的钛合金作填充金属,这时的接头效率将低于 100%。在低温应用场合,常采用间隙元素杂质极低的母材,这时也必须采用间隙元素杂质含量极低的填充金属。

注意,填充焊丝的夹杂及其表面的脏物,油污和拉丝润滑剂可能成为焊缝金属的污染源,且焊丝的表面积和体积比率大,故焊前必须彻底清理。

2) 焊接工艺参数 焊接钛及钛合金时,由于有晶粒粗化倾向,尤其是 β 钛合金的焊接尽量采用较小的焊接热输入。最好是使温度刚好高于形成焊缝所需达到的最低温度。如果热输入量过高,则焊缝被污染、变形和变脆的可能性增大。表 9-9-7、表 9-9-8 和表 9-9-9 分别给出手工、自动钨极氩弧焊和自动脉冲 TIG 焊的参考焊接工艺参数。

3) 操作技术 使用具有陡降(恒流)特性直流弧焊电源。用直流正接,它比直流反接

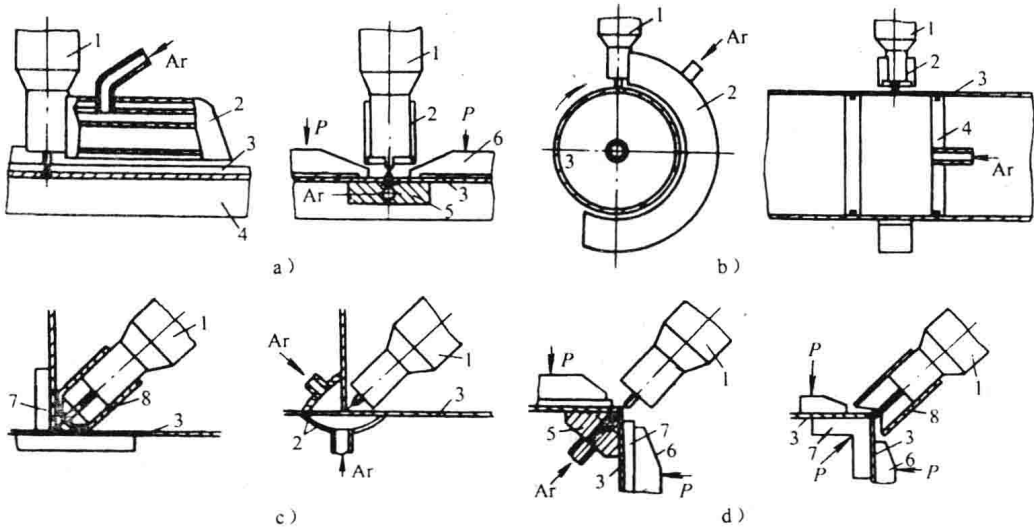


图 9-9-1 钨极氩弧焊的焊炬尾罩和局部保护装置

1—焊炬 2—气保护罩 3—焊件 4—挡板 5—气保护衬垫 6—压板 7—冷却块 8—玻璃罩

能获得较大熔深和较窄的焊道,手工焊时不能用接触法引弧,以防止钨极对焊缝污染,故电源应有高频引弧装置。若在大气中焊接,电源也应有熄弧控制,利用电流衰减的方法可以填满弧坑,利用氩气延时输送,可以在切断焊接电流后焊枪继续供给保护气体,以防止空气污染热态的焊缝金属。

焊接过程有加焊丝和不加焊丝的操作,多层焊时,第一层一般不加焊丝,从第二层起加焊丝。焊丝应平稳而均匀地送进,已烧热的一端必须总保持在气体喷嘴下面受到保护而不被污染。

在不影响视线和加焊丝的情况下,应尽量降低喷嘴与工件之间的距离,一般取 6 ~ 10mm,最大弧长约等于钨极直径 1.5 倍。

焊接速度应控制在确保 400℃ 以上的焊接高温区置于氩气保护之下。焊炬尽量不作横向摆动,须摆动时,其频率要低,幅度要小,防止熔池脱离氩气保护。

焊接层数不宜多,必须多层焊时,层间温度尽可能低,最好待前一层焊缝已冷至室温后再焊下一层焊缝,以防过热。

(3) 焊后处理

钛及钛合金焊后在接头上存在残余应力,会引发冷裂纹;使用过程中降低尺寸的稳定性;增大接头对应力腐蚀开裂的敏感性和降低接头的疲劳强度。所以大多数钛及钛合金焊后都需进行消除应力处理。对于尚需大量焊接的和强力夹紧而受拘束的组件,在总装焊接前需要将已焊的那部分焊件作中间性消除应力处理。

表 9-9-10 列出几种常用钛及钛合金焊后消除应力处理的工艺。

对于工业纯钛和 α 钛合金,必须控制消除应力时的温度和时间,以防晶粒长大。

消除应力处理前焊件表面必须无污垢、手印、油脂或其他残余物,而是经过彻底清除后,在惰性气氛中进行。如果在真空中进行热处理还可以降低焊件氢的含量。



表 9-9-7 钛及钛合金板手工钨极氩弧焊的参考焊接工艺参数 [55]

板厚/mm	坡口形式	钨极直径/mm	焊丝直径/mm	焊接层数	焊接电流/A	氩气流量/L·min ⁻¹			喷嘴孔径/mm	备注
						主喷嘴	拖罩	背面		
0.5	开 I 形坡口对接	1.5	1.0	1	30~50	8~10	14~16	6~8	10	对接接头间的间隙 0.5mm, 也可不加钛丝 间隙 1.0mm
1.0		2.0	1.0~2.0	1	40~60	8~10	14~16	6~8	10	
1.5		2.0	1.0~2.0	1	60~80	10~12	14~16	8~10	10~12	
2.0		2.0~3.0	1.0~2.0	1	80~110	12~14	16~20	10~12	12~14	
2.5		2.0~3.0	2.0	1	110~120	12~14	16~20	10~12	12~14	
3.0	V 形坡口对接	3.0	2.0~3.0	1~2	120~140	12~14	16~20	10~12	14~18	坡口间隙 2~3mm, 钝边 0.5mm 焊缝反面 衬有钢垫板, 坡口角度 60°~65°
3.5		3.0~4.0	2.0~3.0	1~2	120~140	12~14	16~20	10~12	14~18	
4.0		3.0~4.0	2.0~3.0	2	130~150	14~16	20~25	12~14	18~20	
4.0		3.0~4.0	2.0~3.0	2	200	14~16	20~25	12~14	18~20	
5.0		4.0	3.0	2~3	130~150	14~16	20~25	12~14	18~20	
6.0		4.0	3.0~4.0	2~3	140~180	14~16	25~28	12~14	18~20	
7.0		4.0	3.0~4.0	2~3	140~180	14~16	25~28	12~14	20~22	
8.0		4.0	3.0~4.0	3~4	140~180	14~16	25~28	12~14	20~22	
10.0	对称双 V 形坡口	4.0	3.0~4.0	4~6	160~200	14~16	25~28	12~14	20~22	坡口角度 60°, 钝边 1mm 坡口角度 55°, 钝边 1.5~2.0mm 坡口角度 55°, 钝边 1.5~2.0mm, 间隙 1.5mm
13.0		4.0	3.0~4.0	6~8	220~240	14~16	25~28	12~14	20~22	
20.0		4.0	4.0	12	200~240	12~14	20	10~12	18	
22		4.0	4.0~5.0	6	230~250	15~18	18~20	18~20	20	
25		4.0	3.0~4.0	15~16	200~220	16~18	26~30	20~26	22	
30	4.0	3.0~4.0	17~18	200~220	16~18	26~30	20~26	22		

表 9-9-8 钛及钛合金的自动钨极氩弧焊工艺参数 (对接接头) [55]

板厚/mm	坡口形式	成形槽的垫板尺寸		钨极直径/mm	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/m·h ⁻¹	氩气流量/L·min ⁻¹			焊接层数
		宽度/mm	深度/mm						主喷嘴	拖罩	反面	
1.0	—	5	0.5	1.6	1.2	70~100	12~15	18~22	8~10	12~14	6~8	1
1.2	—	6	0.7	2.0	1.2	100~120	12~15	18~22	8~10	12~14	6~8	1
1.5	—	5	0.7	2.0	1.2~1.6	120~140	14~16	22~24	10~12	14~16	8~10	1
2.0	—	6	1.0	2.5	1.6~2.0	140~160	14~16	20~22	12~14	14~16	10~12	1
3.0	—	7	1.1	3.0	2.0~3.0	200~240	14~16	19~21	12~14	16~18	10~12	1
4.0	留 2mm 间隙	8	1.3	3.0	3.0	200~260	14~16	19~20	14~16	18~20	12~14	2
6.0	V 形 60°	—	—	4.0	3.0	240~280	14~18	18~22	14~16	20~24	14~16	3
10.0	V 形 60°	—	—	4.0	3.0	200~260	14~18	9~12	14~16	18~20	12~14	3
13.0	双 V 形 60°	—	—	4.0	3.0	220~260	14~18	20~25	14~16	18~20	12~14	4

表 9-9-9 钛及钛合金自动脉冲 TIG 焊的焊接工艺参数 [55]

板厚/mm	焊接电流/A		钨极直径/mm	脉冲通电时间/s	休止时间/s	电弧电压/V	弧长/mm	焊接速度/m·h ⁻¹	氩气流量/L·min ⁻¹
	脉冲	基值							
0.8	55~80	4~5	2	0.1~0.2	0.2~0.3	10~11	1.2	18~25	6~8
1.0	66~100	4~5	2	0.14~0.22	0.2~0.34	10~11	1.2	18~25	6~8
1.5	120~170	4~5	2	0.16~0.24	0.2~0.36	11~12	1.2	16~24	8~10
2.0	160~210	4~5	2	0.16~0.24	0.2~0.36	11~12	1.2~1.5	14~22	10~12