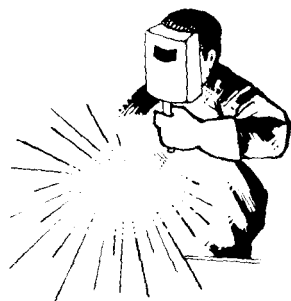


机械工人学习材料

JIXIE GONGREN XUEXI CAILIAO



目 次

- 一 钛及钛合金的基本知识..... (1)
 - 1 钛及钛合金的基本性能(1)—2 钛及钛合金的分类(3)
- 二 钛及钛合金的焊接性能..... (7)
 - 1 焊接特点(7)—2 各种气体等杂质污染对焊接性能的影响(7)—3 各种合金元素对焊接接头的影响(11)
- 三 钛及钛合金熔焊前的准备和焊后热处理..... (13)
 - 1 熔焊前的准备工作(13)—2 焊接接头的焊后热处理(18)
- 四 钛及钛合金的氩弧焊和真空充氩焊..... (22)
 - 1 氩弧焊的特点及工艺(22)—2 真空充氩焊的特点及工艺(44)
- 五 钛及钛合金的其它熔焊方法..... (48)
 - 1 真空电子束焊的特点及工艺(48)—2 等离子弧焊的特点及工艺(53)
- 六 钛及钛合金的电阻焊.....(59)
 - 1 点焊和缝焊的特点及工艺(59)—2 闪光对焊的特点及工艺(66)
- 七 钛及钛合金的钎焊..... (71)
 - 1 钎焊方法及特点(72)—2 钎料(73)—3 叠层状钛基钎料(74)—4 TC4钛合金叶轮的钎焊(76)
- 八 钛合金焊接接头的缺陷及其防止措施..... (76)
 - 1 焊缝成形过程中的缺陷(76)—2 焊接接头中的气孔(78)—3 焊接接头中的裂纹(80)—4 薄板钛合金的焊接变形(81)
- 九 钛合金焊接结构的应用..... (83)
 - 1 焊接结构在航空和宇航技术中的应用(83)—2 焊接结构在造船工业中的应用(85)—3 焊接结构在运输机械中的应用(85)—4 焊接结构在动力机械中的应用(85)—5 焊接结构在化学工业中的应用(86)

随着工业生产和科学技术的不断发展，对金属材料的使用提出了更高的要求。要求金属材料在常温和高温下都具有很高的强度、良好的塑性和韧性以及足够的抗腐蚀性，同时还要具有其它一些特殊的性能。

近年来，工业部门采用的新型结构材料中，钛及钛合金占有重要地位，它们在很大程度上能同时满足上述要求。钛的物理化学性能中最突出的一点是比强度高（强度极限和比重之比称为比强度）。此外，钛在大气、海水和许多强腐蚀介质中均具有良好的抗腐蚀性。因此，钛合金已广泛地应用于宇航、航空、化工、石油、造船等工业部门。

但钛合金焊接时会遇到很大的困难。如高温时，特别是在熔化状态下，钛对大气中的气体具有很强的化学活性。钛具有较高的熔点，经受焊接热循环作用后，在焊缝及热影响区常会发生组织转变，并形成脆性相。

现有的资料表明，我国钛铁矿极其丰富。为了把我国钛的资源优势转变为产业优势，促进钛合金在机械工业等部门中获得进一步推广应用，广大焊接工作者应努力掌握钛合金的焊接技术。

一 钛及钛合金的基本知识

1 钛及钛合金的基本性能 钛 (Ti) 位于周期表第4周期第IVB族，钛的原子序数为22，原子量47.9。

钛具有金属光泽，外表与钢很相似，熔点为1668℃，密度4.51克/厘米³。钛在高温和低温下都具有良好的性能，例如铝在150℃，不锈钢在310℃时就会失去原有的性能，而钛在550℃时，

性能还保持不变。钛在超低温下(例如 -253°C),也能保持良好的性能。利用钛制作的零部件,可以使结构重量减轻,但不降低强度。

表1列出了钛的基本物理性能,这些特性在研究焊接工艺时是需要充分掌握的。为了进行比较,表内同时列出了机械工业常用的钛、铁、铝、铜的性能。

表1 钛、铁、铝、铜的物理性能

金属性能	钛	铁	铝	铜
原子量	47.9	55.9	26.98	63.54
密度(克/厘米 ³)	4.51	7.86	2.70	8.94
熔点 $^{\circ}\text{C}$	1668	1539	660	1083
沸点 $^{\circ}\text{C}$	3260	2740	2327	2595
比热(20 $^{\circ}\text{C}$)[卡 ^① /(克·开)]	0.129	0.109	0.215	0.0915
导热系数(20 $^{\circ}\text{C}$)[卡/(厘米·秒·开)]	0.045	0.18	0.538	0.94
线胀系数($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$)	8.2	11.9	24.3	16.5
20 $^{\circ}\text{C}$ 时的电阻系数(欧·厘米 $\times 10^{-6}$)	42.1	9.71	2.68	1.72
弹性模数(公斤力 ^② /毫米 ²)	11200	20000	7250	12250

① 1卡=4.1868焦耳;②1公斤力=9.8牛。(下同)

从表1数据中可看出,钛的比重较小,约为铁的一半,所以钛属于一种轻金属。钛的熔点和沸点很高。钛的比热介乎铝和铁之间。由于钛的导热系数是铁的四分之一,是铝的十三分之一,所以,与钢材焊接时相比,钛材焊接时能量损失较小。

钛的弹性模数较小,这是它的缺点。因此在许多情况下,用增加构件的截面积,来保证结构的足够刚度,并在钛中加入适当的合金元素,以提高它的弹性模数。

钛在海水以及潮湿环境中均有良好的抗腐蚀性。钛的良好抗腐蚀性,由于在其表面上形成了钝化层,这种钝化层可牢固地和基本金属联系在一起,从而防止金属表面和电解质直接接触。钛表面上形成的氧化膜厚度,通常达到50~60埃(1埃= 10^{-10} 米)。

因为氧通过氧化膜的扩散速度很小，所以氧化膜保护金属，防止继续氧化。

综上所述，钛及钛合金具有强度高、塑性好、比重轻、熔点高、抗腐蚀性能好等优点。钛的缺点是弹性模数低、蠕变性大、生产过程复杂、价格昂贵等。

2 钛及钛合金的分类 钛及钛合金可分为铸造的和变形的两大类，目前工业上应用最广的是变形钛合金。钛具有两种晶格结构，在882℃以下的晶格结构，称为 α 钛，在882℃以上的晶格结构，称为 β 钛，即钛在882℃进行同素异构转变。

根据合金元素的含量及金相组织的不同，钛合金可分为三类：

一、 α 相钛合金 属于这类的有工业纯钛以及含有 α 稳定元素和中性强化元素的钛合金，它们具有 α 固溶体组织。这类合金借助于生成固溶体达到强化的目的，热处理不能强化，冷作硬化略能提高强度，但冷作硬化能导致塑性降低，所以它的使用受到一定限制。

α 钛合金只能进行低温退火，目的是消除冷作硬化的影响及焊接应力。这类合金在400~500℃以内，具有良好的热稳定性，即使在长时间高温的作用下，仍能保持良好的塑性。

二、 β 钛合金 经热处理后这类钛合金的强度极限可达到150公斤力/毫米²，这说明 β 钛合金具有很高的比强度。这类合金的缺点是热稳定性差，晶粒长大的倾向性大，所以对热加工带来很大的困难。 β 钛合金目前在工业上还没有得到广泛应用。

三、 $\alpha+\beta$ 钛合金 热处理对这类合金的机械性能有很大的影响，其缺点是随着温度的升高，强度急剧下降。

我国钛合金的分类是以汉字拼音字母及序数号组合起来表示的，例如：

TA6-4A表示 α 钛合金，6表示序数号；

TB1-TB表示 β 钛合金，1表示序号号；

TC4-TC表示 $\alpha+\beta$ 钛合金，4表示序号号。

钛及钛合金的主要化学成分见表2。

表2 钛及钛合金的主要化学成分

牌号	主要化学成分 (%)										
	钛	铝	铬	钼	锡	锰	钒	铁	铜	硅	硼
TA1 ^①	基	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TA2 ^②	基	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TA3 ^③	基	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TA4	基	2.0 ~3.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TA5	基	3.3 ~4.3	—	—	—	—	—	—	—	—	0.005
TA6	基	4.0 ~5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TA7	基	4.0 ~5.5	—	—	2.0 ~3.0	—	—	—	—	—	—
TC1	基	1.0 ~2.5	—	—	—	0.8 ~2.0	—	—	—	—	—
TC2	基	2.0 ~3.5	—	—	—	0.8 ~2.0	—	—	—	—	—
TC3	基	4.5 ~6.0	—	—	—	—	3.5 ~4.5	—	—	—	—
TC4	基	5.5 ~6.8	—	—	—	—	3.5 ~4.5	—	—	—	—
TC5	基	4.0 ~6.2	2.0 ~3.0	—	—	—	—	—	—	—	—
TC6	基	4.5 ~6.2	1.0 ~2.0	1.0 ~2.8	—	—	—	0.5 ~1.5	—	—	—
TC7	基	5.0 ~6.5	0.4 ~0.9	—	—	—	—	0.25 ~0.6	—	0.25 ~0.6	0.01
TC8	基	5.8 ~6.8	—	2.8 ~3.8	—	—	—	—	—	0.2 ~0.35	—
TC9	基	5.8 ~6.8	—	2.8 ~3.8	1.8 ~2.8	—	—	—	—	0.2 ~0.4	—
TC10	基	5.5 ~6.5	—	—	1.5 ~2.5	—	5.5 ~6.5	0.25 ~1.0	0.35 ~1.0	—	—
TB1	基	3.0 ~4.0	10.0 ~11.5	7.0 ~8.0	—	—	—	—	—	—	—

注：①TA1含Fe \leq 0.15, Si \leq 0.10, C \leq 0.05, N \leq 0.03, H \leq 0.015, O \leq 0.10 (%)；

②TA2含Fe \leq 0.30, Si \leq 0.15, C \leq 0.10, N \leq 0.05, H \leq 0.015, O \leq 0.15 (%)；

③TA3含Fe \leq 0.30, Si \leq 0.15, C \leq 0.10, N \leq 0.05, H \leq 0.015, O \leq 0.15 (%)。

钛及钛合金板材的室温机械性能见表3。

表3 钛及钛合金板材的室温机械性能

合金系和类型	牌 号	板材厚度 (毫米)	抗拉强度 (公斤力/毫米 ²)	延伸率 (%)	冷弯角 (度)
工业纯钛 (α 型)	TA1	0.3~2.0	35~50	4 ⁰	140
		2.1~10.0		30	130
	TA2	0.3~2.0	45~60	30	100
		2.1~10.0		25	90
	TA3	0.3~2.0	55~70	25	90
		2.1~10.0		20	80
钛铝合金 (α 型)	TA6	0.8~1.5	70	20	50
		1.6~2.0		15	40
		2.1~10.0		12	40
钛铝锡合金 (α 型)	TA7	1.0~1.5	75~95	20	50
		1.6~2.0		15	50
		2.1~10.0		12	40
钛铝锰合金 ($\alpha+\beta$ 型)	TC1	0.5~1.0	60~80	25	90
		1.1~2.0		25	70
		2.1~10.0		20	60
	TC2	1.0~2.0	70	15	60
		2.1~10.0		12	50
钛铝钒合金 ($\alpha+\beta$ 型)	TC4	棒 材	95 119.52	10 8	30 (退火) —(淬火+时效)
	TC10	1.0~4.0	108	10	25
	TC3	1.0~2.0	90	10	35
		2.1~10.0		8	30
钛铝钼铬合金 (β 型)	TB1	1.0~3.5	≤110	16	110 (退火)
			130	5	—(淬火+时效)

国内外钛及钛合金的牌号对照表列于表4。

表4 国内外钛及钛合金的牌号对照表

类 型	国产牌号	相 应 国 外 牌 号			
		苏	美	英	日
工业钛	TA1		Ti-35A	IMI115	KS50
	TA2	BT1	Ti-50A	IMI125	KS60
	TA3	BT1	Ti-65A	IMI135	KS85
α 钛合金	TA4	48-T2			
	TA5	48-OT3			
	TA6	BT5			
	TA7	BT5-1	Ti-5Al-2.5Sn	IMI317	KS115 AS
$\alpha+\beta$ 钛合金	TC1	OT4-1		IMI315	
	TC2	OT4-1			
	TC3	BT6-C			
	TC4	BT6	Ti-6Al-4V	IMI318	
	TC5	BT8			
	TC6	BT3-1			
	TC7	AT6			
	TC8	BT8			
	TC9	BT9			
	TC10		Ti-6Al-6V-2Sn		
β 钛合金	TB1	BT15			

二 钛及钛合金的焊接性能

1 焊接特点 钛及钛合金的焊接性能，具有许多显著的特点，这些特点是由钛及钛合金的物理性能所决定的。钛及钛合金的焊接特点有：

一、钛的化学活性大，不仅在熔化状态，即使在 400℃ 以上的高温固态下，也极易被空气、水分、油脂、氧化膜等污染，吸收氧、氮、氢、碳等杂质，使焊接接头的塑性和韧性显著降低，并易引起气孔。因此，焊接时对熔池、焊缝及温度超过 400℃ 的热影响区都要加以妥善保护。

二、由于钛的熔点高、热容量、导热性差，因此，焊接接头易产生晶粒长大倾向（特别是 β 钛合金），从而引起接头塑性降低。因此，对焊接线能量要严格控制，宜用小电流、快速焊。

三、在氢和焊接残余应力的作用下，可导致冷裂纹。所以对焊接接头的含氢量要控制，对复杂的焊接结构需要在焊后消除应力处理。

四、钛的弹性模量约比钢小一半，因此焊接变形大，而且校正变形较困难。

2 各种气体等杂质污染对焊接性能的影响 对钛和钛合金的焊接性能，有很大影响的气体等杂质是氧、氮、氢、碳、铁等。现分别概述如下：

氧 氧在高温下很易溶解于 α 钛和 β 钛中。温度接近 500℃ 时，钛开始在空气中氧化。低于 500℃ 时，钛的表面是一层钝化膜。当温度接近 850℃ 时，氧化物在钛中的溶解速度迅速增大。钛合金表面的氧化膜颜色，当温度低于 820℃ 时为黄色，从 820℃ 增至

950℃时，钛的表面色泽由桔黄色变成灰白色。氧化膜的成分为二氧化钛 TiO_2 。

钛吸收氧的强烈程度与温度及时间的关系如图1所示。

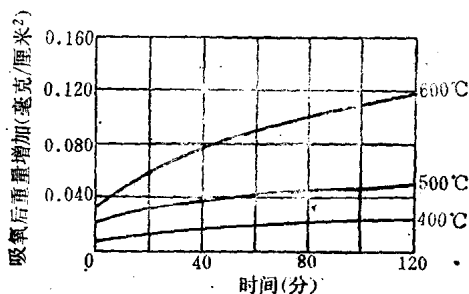


图1 钛吸收氧的强烈程度与温度及时间的关系。

焊缝含氧量与氩气中含氧量的关系如图2所示。从图2可看出，焊缝含氧量随氩气中含氧量的增加而直线上升。

含氧量对工业纯钛机械性能的影响见图3，随着含氧量的增加，工业纯钛的抗拉强度增加，而塑性下降。当焊缝含氧量在0.3%以上时，容易产生焊接裂纹。我国现行技术条件规定工业纯钛及钛合金基本金属的含氧量一般应小于0.15%。

根据冷却速度的不同，工业纯钛具有不同的金相组织，缓冷时得到 α 钛，快冷时得到钛马氏体， β 相转变过程中的这种针状组织称之为 α' 相（钛马氏体）。钛被氧污染后，焊缝容易获得这种很脆的 α' 相。

氮 氮和氧一样，是 α 相稳定元素。钛和氮的亲合力特别大，高温时，氮和钛很容易形成溶解于金属中的氮化物。

氮在液态金属中的溶解度，是随着电弧气氛中氮的分压增高而增大。氮对提高工业纯钛焊缝的强度极限、硬度，降低焊缝的塑性，比氧更显著，即氮的脆化作用更强烈。

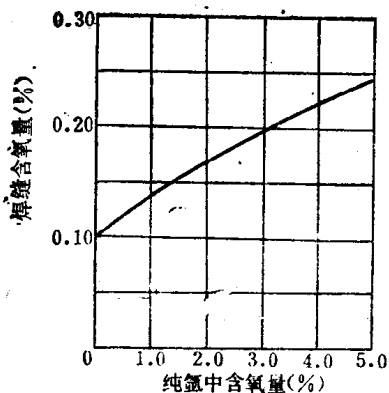


图2 纯钛中含氧量变化对焊缝含氧量的影响

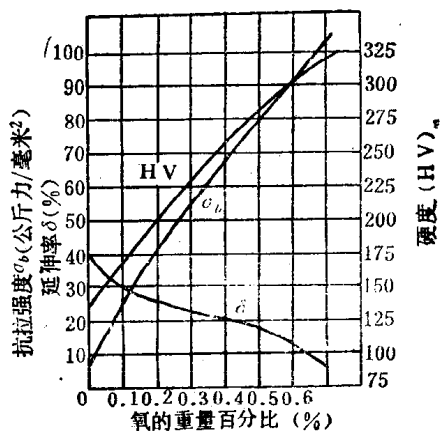


图3 氧含量对工业纯钛机械性能的影响

一般认为，工业纯钛焊接时，焊缝中最高允许含氮量为0.05%。我国现行技术条件规定的工业纯钛及钛合金基本金属含氮量也是不大于0.05%。

氢 氢对钛及钛合金机械性能的影响很显著。许多钛合金零件的脆性破坏往往是由于氢作用的结果。氢通过各种渠道进入合金中，例如在冶炼加工过程中，进行热处理以及酸洗时，特别是钛合金零件，在含有水气及碳氢化合物的条件下进行高温加热时，很容易吸收氢，所以在石油加热炉中进行热处理钛合金零件时，炉子的气氛应是稍微带氧化性的。

钛吸收氢是一种可逆反应，高温时钛和氢的合金成分是不稳定的，随时都可以和周围的氢保持静态平衡。

钛吸收氢的强烈程度与温度及时间的关系见图4。

氢对钛及钛合金机械性能的影响，与氢在合金中所处的形状有关。以固溶体形式存在的氢影响较小；间隙固溶体中的氢原

子，易建立应力状态，从而引起塑性的下降。氢在钛中的溶解度，和温度及结晶组织有关。纯 α 钛，温度为 335°C 时，含氢量接近 0.18% ，但在室温时降至 0.002% 。

焊缝含氢量对焊缝及焊接接头机械性能的影响见图5。从图中可看出，含氢量对焊缝冲击韧性的影响最大。焊接工业纯钛时，焊缝含氢量一般控制在 0.015% 以下。

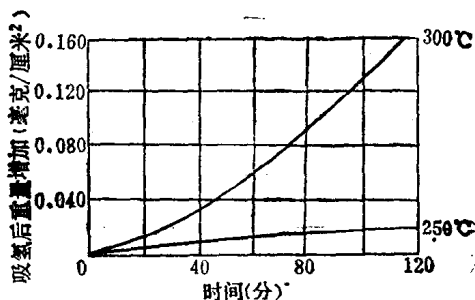


图4 钛吸收氢的强烈程度与温度及时间的关系

碳 当温度接近 α 相转变为 β 相时，碳在 α 钛中的最大溶解度为 0.28% 。随着温度降低，碳在 α 钛中的溶解度急剧下降。在 β 钛中，碳的含量接近 0.06% 。由于碳的溶解度小，所以即使含碳量

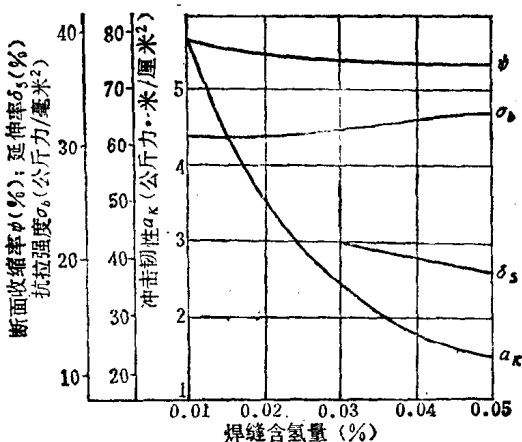


图5 焊缝含氢量变化对焊缝及焊接接头机械性能的影响

很少时，也会产生碳化物，促使焊缝脆化。

碳对钛的机械性能影响见图6。从图中可看出，当含碳量为0.1~0.2%时，塑性显著地降低，但提高了材料的强度和硬度。当含碳量超过0.1~0.2%时，对机械性能的影响不大。

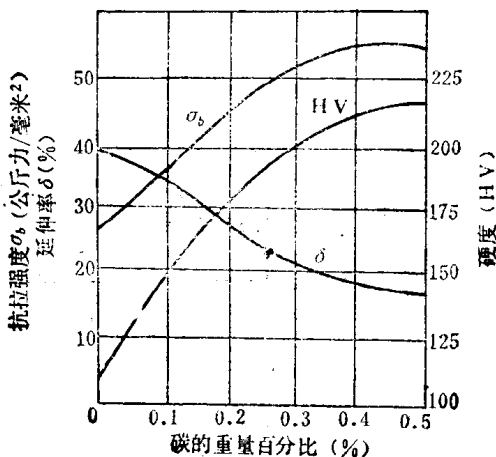


图6 碳对钛的机械性能影响

焊前对焊件清除不干净，焊件表面上残存油污等都可引起焊缝增碳。当焊缝含碳量为0.55%时，焊缝塑性几乎全部消失。

3 各种合金元素对焊接接头的影响 各种合金元素在不同程度上可提高焊缝的强度，其强化作用见图7。随着合金元素含量的增加，焊缝金属的硬度提高，相对延伸率降低。当合金元素含量少时（2~3%以内），断面相对收缩率略有提高，含量继续增加时，则有所下降。焊缝的冲击韧性也有类似的变化。

铝不但能提高钛合金焊缝的热强性、抗腐蚀性，还能提高抗蠕变和抗氧化的能力。焊缝中含铝量在3%以内时，实际上不改变熔化金属的微观组织，当含铝量为5%时，焊缝金属中就会产生粗大的针状组织，使焊缝的塑性降低。含铝量为7%的焊接试

样冷弯角，仅为不含铝试样的40%左右。焊缝金属的冲击韧性变化不大。通常焊缝中的含铝量不超过6%。

锡、锆含量控制在8~10%以内时可提高钛合金焊缝的塑性和韧性。

含钼量为3~4%的钛合金焊缝，具有良好的塑性和韧性。如果继续提高钼的含量（大于6%），则就显著地降低上述性能。

锰、铁、铬等 β 稳定元素对焊缝金属的强化作用最显著。

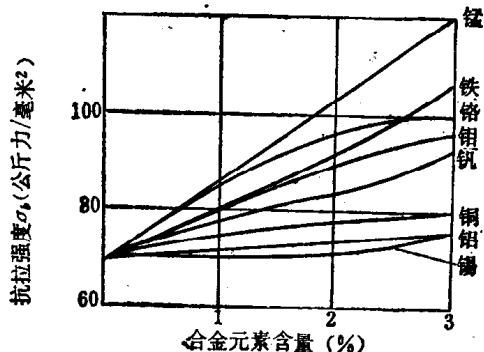


图7 合金元素对钛合金焊缝的强化作用

随着铜含量的增加，焊缝金属的强度相应提高，而降低其塑性和韧性。当含铜量不超过2%时，焊缝金属具有满意的机械性能。

合金元素对于焊缝接头产生氢脆的倾向性影响很大。例如，焊缝金属含有0.05%氢的工业纯钛，焊后可能产生氢脆。但是，根据合金元素含量的不同，即使含量为0.05%氢的焊缝，其氢脆现象将会改变。铝、锡等保持单相组织的元素，不能消除对于氢脆的敏感性。含钼5%的焊缝能提高其冲击韧性达5公斤力·米/厘米²；而含铁为5%时可达3.6公斤力·米/厘米²。在这些试验的基础上，曾得出结论，为了消除氢脆，应在焊缝中含有若干种 β 钛稳定元素，其中以钼的作用最为显著。

合金元素对钛及钛合金焊缝的抗氧化性具有较大的影响。铝、铌、钽、钨、硅等显著地提高焊缝的抗氧化性。

α 钛合金焊接时，焊接规范参数可以在较大的范围内调节。

根据使用条件， $\alpha+\beta$ 钛合金的焊接接头要进行退火或者强化热处理——淬火和时效。 $\alpha+\beta$ 钛合金焊接时，焊接规范对近缝区组织、性能及尺寸大小的影响，取决于合金成分。一般情况下，随着 $\alpha+\beta$ 钛合金合金化程度的提高，焊接时的冷却速度（ ω_c 值）应该减小。对于广泛应用的TC4， ω_c 不应超过40℃/秒。当冷却速度增大时，由于淬火的结果，生成 α' 相，降低金属的塑性。

选择 β 钛合金焊接工艺时，将会遇到很多困难。例如，和 α 、 $\alpha+\beta$ 钛合金相比，它们对气体杂质的敏感度更高；由于合金元素含量高，在焊缝和热影响区内，化学成分和物理性能的不均匀性更加严重；这类合金由于焊接热过程的影响，其相变和组织变化有一定的特点，对基本金属有一定的影响。


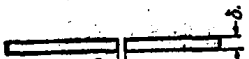
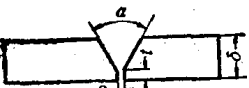



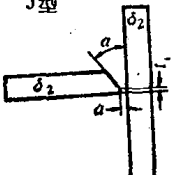
β 钛合金对高温加热后的冷却速度很敏感，减慢冷却速度将降低接头的塑性。焊接过程中，需要有很高的冷却速度，一般达到100~500℃/秒。

三 钛及钛合金熔焊前的准备和焊后热处理

1 熔焊前的准备工作

一、熔焊接头型式和尺寸 钛及钛合金熔焊的接头型式，除电子束焊、等离子弧焊一般只选用对接接头外，其余熔焊接头型式的选择和其它材料焊接接头型式选择相同，主要根据所焊板材厚度而定。但考虑到钛及钛合金熔焊时的特点，接头型式要有利于气体保护和尽可能减少焊缝层数和填充金属量。对于搭接接头，由于背面保护困难，此外接头受力条件也差，所以尽可能不采用，同时也不采用永久性垫板对接。

表5 钛及钛合金熔焊的接头型式和尺寸

接头型式	板材厚度 δ (毫米)	间 隙 a (毫米)	坡口角度 α (度)	钝边高度 t (毫米)	坡口半径 r (毫米)
卷边型 	0.5~0.8	0	—	—	—
I 型 	0.5~1.5 1~2	0~0.2 0~0.5	— —	— —	— —
V 型 	1.5~3 3~16	0~1 0~2	60~90 60~90	0.5~1 1~1.5	— —
X 型 	12~38	0~2	60~90	1~1.5	—
U 型 	12~38	0~2	15~30	1~1.5	6~10
Y 型 	>19	0~2	15~30	1~1.5	6~10
J型 	1~3 3~12	(0~0.1) δ	0~45 30~45	(0.1 ~0.25) δ	—

钛及钛合金熔焊的接头型式和尺寸参见表5。应该指出：表中所列参数仅作参考，根据实际焊件可作适当修正、改变。

钛及钛合金接头端面的加工方法原则上采用机械加工法，也有采用氧-乙炔火焰切割钛板，但必须采取一些措施，在焊接前仍需对被切割后的接头端面进行机械加工。

二、焊前表面清理 钛及钛合金在受热状态下极易和氧、氮、氢以及含有上述气体的物质发生化学反应，从而引起焊缝组织疏松和产生气孔，因此在焊前必须对钛及钛合金板的表面进行严格清理。

(一) 表面除油：表面除油方法有两种：一种是用汽油、酒精或丙酮进行整体或局部擦拭除油；另一种是用上述方法除油后，再用化学清洗剂作进一步除油。化学除油液成分如下：

氢氧化钠20~50克/升、无水碳酸钠不小于30克/升、磷酸三钠20~30克/升、硅酸钠3~5克/升。

将零件浸入60~90℃的上述溶液中，经5~10分钟后，用流动热水冲洗，然后用冷水冲洗，最后用清洁、干燥、无油的压缩空气吹干。

(二) 表面酸洗：表面酸洗的目的是去除表面氧化膜。常用的钛及钛合金酸洗液有：

1) 硝酸40%、氢氟酸20%、水58%。在室温下浸泡15~20分钟，然后用水冲洗。

2) 硝酸50~60毫升/升、盐酸200~250毫升/升、氟化钠45~50毫升/升、水约724毫升/升。浸泡时间约7分钟，然后用水冲洗。

3) 盐酸250克、氟化钠50克、水700克。浸泡时间10~20分钟，然后用水冲洗或在上述溶液中去除厚氧化膜后，再放入硝酸(1份)、氢氟酸(1份)、水(3~4份)的溶液中进行光亮