

前 言

钛和钛合金由于比强度大,耐腐蚀性能好,所以首先被广泛地应用于宇航工业方面,用作火箭、导弹的外壳,飞机的结构件和航空发动机零件,同时也用作高温高压耐腐蚀设备的结构件。本专辑根据“洋为中用”的原则,从工艺操作和金相分析等介绍了钛和钛合金的焊接、质量控制方面的问题,可供从事这方面工作的工人、技术员参考。本辑第一篇译文,承上海电焊机厂审阅,特表谢意!

我们将不定期地介绍国外焊接技术的应用情况。由于我们水平有限,编译不当和错误之处在所难免,望读者批评指正。

编 者 1975 年 7 月

目 录

1. 钛和钛合金的焊接	(1)
2. 钛和钛合金的焊接	(29)
3. 钛的电子束焊接	(45)
4. Ti-6Al-6V-2Sn 合金板的电子束焊接	(53)

第二辑要目预告

1. 电子束焊接研究
2. 用于发动机的高负载旋转件的电子束焊接

钛和钛合金的焊接

一、摘 要

本报告是钛冶金实验室报告第31期“焊接钛和钛合金”(1956年2月份发行)的最新修订本。自从第31期报告发表以来,在下述方面取得了一些进展:(1)制造厂已在生产中着手利用惰性气体保护金属极弧焊;(2)焊接组件中,合金用于较广范围;(3)已经发展了有关某些合金焊接接头工程性能的很多资料;(4)钛被证实为一种用于不用火焰加热的压力容器的结构材料。

焊接钛和钛合金组件是用于构架、喷气发动机和化学设备上的,这些组件是由薄片、杆、板和锻件制成的,是利用惰性气体保护金属极弧焊、点焊、缝焊、闪光对焊和加压焊来接合的。其它通用的焊接方法,如气焊、有活性气体、药皮电焊条的弧焊或焊剂层下的弧焊,不能适应焊接这些金属,其主要有两个原因:

(1) 钛和钛合金当加热到焊接温度时,是非常活泼的,与大气和大多数元素以及包括众所周知的耐熔化合物迅速起反应。

(2) 钛焊缝的延展性和韧性由于少量杂质(特别是碳、氢、氮和氧)的存在而降低了。

尽管钛和钛合金的活泼性和低的杂质容许量,钛组件仍是容易地由点焊、缝焊、闪光对焊和压焊来接合。正常的焊接程序用这些方法是令人满意的。然而,由于钛和钛合金的活泼性和低的杂质容许量,钨极和金属熔化极惰性气体保护焊这两种操作是受影响的。为确保把这两种方法采用到焊接钛组件中同样防止焊接沾污,就采取了特殊的程序,包括利用大的气体喷嘴和拖尾罩,以保护大气中的焊缝表面;利用引入惰性气体的衬垫杆,以保护大气中的焊缝背面。充满惰性气体的焊接箱也常用于这种方法。保护气体的露点用作气体纯度的一种标准。

在计划焊接钛组件中,合金的选择是重要的。工业纯钛和 α 型合金对热处理不受影响,其机械性能受显微组织的变化而稍有影响。这些合金容易适合于各种类型的焊接操作。根据合金含量, α - β 合金的机械性能很受热处理和显微组织变化的影响。在选择 α - β 合金作焊接用时,需要作特殊的考虑,因为有些合金通过焊接操作而大大变脆。只有一种 β 合金目前是可采用的, β 合金的焊接接头在焊接状态的延展性强,但其强度低。当热处理时,强度增加,而焊缝延展性降低。目前还不可能使这种合金在焊接组件达到可能的全部强度。但是,近来的进展是令人鼓舞的。

工业纯钛和 α 型合金Ti-5Al-2.5Sn都广泛地用于焊接组件。其它同样有希望的 α 型合金可采用,但是这些合金用于生产焊接组件之前,需要更多的有关这种合金机械性能资料,也需要更多的焊接经验。

在焊接 α - β 合金中,所用焊接操作的类型是重要的。只有一种 α - β 合金(Ti-6Al-4V)是用在惰性气体保护焊中。然而,其它几种合金将来也可用于这种操作中。点焊似乎比惰性

气体保护焊更容易适合于焊接 α - β 合金,但是用于生产点焊组件的合金数是有限制的。闪光对焊容易适合于焊接 α - β 合金,且用于在惰性气体保护金属极弧焊中焊得不满意的许多合金。

β 合金是新型的,没有用在生产焊接操作中。

虽然钛和钛合金它们自己可以焊接,或互相焊接;而把钛和钛合金焊接到其它金属中去就困难了。这由于钛和大多数金属合金化时,形成脆性金属互化物(或固溶体),当利用熔化两种基体金属的方法把钛焊接到其它金属中去时,则金属互化物的结构形成了。然而,把钛焊接到其它金属中去是很有益处的;实验室工作发展的一种焊接方法是有足够成功的希望的。

二、引言

自从 1956 年 2 月份发行钛冶金实验室报告第 31 期以来,在焊接钛组件中,已作出了许多进展。惰性气体保护金属极弧焊现在用于焊接钛组件,而在以前是仅用于实验室的。同样,钛合金 Ti-5Al-2.5Sn 和 Ti-6Al-4V 现在都用于焊接组件,而在以前,这些组件是由工业纯钛制造的,或是铆接的。另外,美国机械工程师学会已经把非合金化的钛作为一种不用火焰加热的压力容器的制造材料。

在实验室中也作出了进展。合金焊接接头的工程性能方面,已发展了大量资料。关于 Ti-5Al-2.5Sn 和 Ti-6Al-4V 合金,得到了充分的数据可以把它们用于焊接组件。同样,也得到了许多新合金的焊接性能方面的数据。虽然这些数据是有限的,但表示出这些合金在最近的将来可用于焊接组件。

因为焊接经验丰富了,所以发现了一些新问题,最重要的是脱脂操作。过去,三氯乙烯蒸汽脱脂是广泛使用的。然而,在消除和测定应力处理时的应力腐蚀裂纹却是起因于焊接组件中三氯乙烯的残留。因此,这种脱脂操作应小心进行。

本报告代替以前的关于钛焊接方面的报告,它包括以前报告中的重要资料,再加上已发展的新资料。报告中讨论了下面六个方面:(1)影响钛和钛合金焊接操作的冶金学性能和化学性能;(2)表面清洗;(3)焊接方法;(4)质量检验;(5)消除应力处理;(6)工业和半工业钛轧制品的焊接接头的机械性能。

三、化学性能和冶金学性能

钛和钛合金的焊接操作主要受下列三个因素的影响:

(1)在高温时,钛的强化学活度。(2)一些杂质对焊接接头机械性能的影响。(3)合金含量对钛的机械性能和热处理响应的影响。

1. 化学活度

当加热到焊接温度时,钛和钛合金能与空气、大多数元素和化合物(包括大家熟知的耐熔物)起反应。因此,活性气体和焊剂是与热金属接触的气熔焊以及电弧焊方法都是不实用的,因为焊缝非常容易沾污且变脆。然而,可以用惰性气体保护金属极弧焊、点焊、缝焊、闪光对焊和加压焊。用惰性气体保护金属极弧焊方法中,氩或氦使焊缝和空气隔离,不使焊缝沾污。在

点焊和缝焊中,焊缝中熔化的钛是由钛基金属围着的,所以焊缝不会沾污。在闪光对焊和加压焊中,空气是与焊缝接触的,但是大部分沾污金属是挤出焊区的,残留的杂质扩散到离开焊缝界面的金属中去。

2. 杂质的影响

钛焊缝的延展性和韧性由于某些杂质的少量存在而降低了。主要的有害杂质是碳、氢、氮和氧,这些元素对焊缝的延展性和韧性的影响是逐步的。

焊接接头容许的杂质质量依赖于焊缝以后的用途和被焊的合金。降低焊缝韧性的杂质质量要比降低延展性的杂质量少。因此,在制造受到冲击载荷的组件中,需要特别小心,以确保防止焊缝受沾污。同样,在某些合金中焊缝的延展性和韧性比另一些合金中焊缝的较好。焊缝中容许的杂质质量是和其延展性和韧性有关的。高延展性的焊缝比低延展性的焊缝能容许有较大的杂质质量。

焊接前在基体金属中存在的杂质,或在焊接时引入的杂质,会使焊缝变脆。早期生产的钛,比今天所购买的钛可能有过量的杂质含量。

有关杂质对焊接接头性能的影响的详细资料可在著作[1~8]中找到。

3. 合金元素的影响

如同大多数金属那样,合金元素影响钛焊接接头的性能。

把钛焊到钢、镍和铜合金中去是困难的,因为当钛与这些金属高度合金化时,通常产生脆性结构。高度合金化的结构是在用熔化两种基体金属方法作成的焊缝熔化区内形成的。这些区域含有脆性的金属互化物,并且是很脆的。铌、钼、钽和锆比钢、镍和铜焊到钛中较合适。当钛与铌、钼、钽或锆高度合金化时,没有形成脆性的金属互化物,但是固熔体常常是过量的,且钛和这些金属间的接头会有低的延展性。

把钛接合到其它金属中去的焊接操作的发展很有益处,实验工作已经完全成功,因此这种发展是可能的。然而,目前钎焊是把钛接合到其它金属中去最可靠的方法。

工业和半工业钛金属的合金含量、名称和轧制形状列于表1。根据合金含量,这些金属分为工业纯钛、 α 合金、 α - β 合金和 β 合金。这些分类符合于合金所显示的某些冶金学性能。而这些冶金学性能又影响合金在焊接操作中的性能。

(1) α 合金

冶金学上,工业上纯钛的等级是 α 型合金。

α 合金的机械性能仅轻微地受热处理及其显微组织的变化而影响。因此,焊接操作对 α 合金的性能没有多大影响。这些合金中的焊接接头是可延展的,且具有等于或大于基体金属的强度。

(2) α - β 合金

根据合金含量, α - β 合金的机械性能会通过热处理而有很大变化。同样,许多这类合金的延展性因显微组织的改变而变化。有一些 α - β 合金通过焊接操作而大大变脆了,而另一些 α - β 合金的焊接接头是延性的。

在选择焊接应用的 α - β 合金时,必须慎重考虑合金含量和以后的用途。一般来说,采用惰性气体保护金属极弧焊时,含有铬、铁、锰、钼约大于3%以及钒约大于4~6%(一种或二种以上)的合金是不用的,因为焊缝延展性不好。虽然焊缝延展性可通过热处理而改善,但其它合金更合适。同样,如果以后是要在高温下长时间工作用的,那么有些 α - β 合金的焊缝接头

表1 工业的和半工业的钛的轧制品

额 定 成 份 (重量百分比)	制 造 厂 商 名 称				宇航用材料规格	轧 制 形 状①	
	美国铝业公司		共和钢铁公司				美国钛金属公司
工 业 纯 钛(α型合金)							
99.2 Ti	A-40	MST-40	RS-40	Ti-55 A	4902	a, b, c, d, e, f, g, h	
99.2 Ti	A-55	MST-55	RS-55	Ti-65 A	4900 A	a, b, c, d, e, f, g, h	
99.2 Ti	A-70	MST-70	RS-70	Ti-75 A	4901	a, b, c, d, e, f, g, h	
				Ti-100 A			
α 钛 合 金							
Ti-5 Al-2.5 Sn	A-100 AT	MST-5Al-2.5 Sn	RS-110 C	Ti-5Al-2.5 Sn	4926	a, b, c, d, e, f, g, h	
Ti-6 Al-4 Zr-1 V	—	—	—	Ti-6Al-4 Zr-1V	—	c, d	
Ti-8 Al-2 Nb-1 Ta	—	MST-821	—	—	—	a, b, c, d, g	
Ti-8 Al-8 Zr-1(Cb + Ta)	—	MST-881	—	—	—	a, b	
Ti-8 Al-1 Mo-1 V	—	—	—	Ti-8Al-1 Mo-1V	—	a, b, d	
α-β 钛 合 金							
Ti-3Al-2.5V	—	MST-3 Al-2.5 V	—	—	—	e, f	
Ti-5 Cr-3 Al	—	MST-3 Al-5 Cr	—	—	4927	a, b, c	
Ti-8 Mn	C-110 M	MST-8 Mn	RS-110 A	—	4908 A	c, d	
Ti-2 Fe-2 Cr-2 Mo	—	—	—	Ti-140 A	4923	a, b, d, e, f	
Ti-4 Al-4 Mn	C-130 AM	MST-4 Al-4 Mn	RS-130	—	4925 A	a, b, c, g	
Ti-4 Al-3 Mo-1 V	C-115AMoV	—	RS-115	Ti-4 Al-3 Mo-1V	—	c, d	
Ti-4Al-4 Mo-4 V	—	—	—	Ti-4 Al-4 Mo-4V	—	a	
Ti-5 Al-2.7 Cr-1.25 Fe	—	—	RS-140	—	—	a, b, c, d	
Ti-5Al-1.5Fe-1.4Cr-1.2Mo	—	—	—	Ti-155 A	4929	a, b, c	
Ti-6 Al-4 V	C-120 AV	MST-6 Al-4 V	RS-120 A	Ti-6 Al-4V	4911	a, b, c, d, e, f, g, h	
Ti-7 Al-4 Mo	C-135 AMo	—	RS-135	Ti-7Al-4 Mo	4928	a, b, g, h	
Ti-16 V-2.5 Al	C-105 VA	MST-16V-2.5Al	—	—	—	a, b, c, d, e, g	
β 钛 合 金							
Ti-13 V-11Cr-3 Al	B-120 VCA	—	RS-120 B	Ti-13V-11Cr-3Al	—	a, b, c, d, e, g	

① a—棒, b—短条, c—板, d—薄片, e—带, f—管, g—丝, h—挤压件

由于热不稳定而容易变脆。

可以通过利用特殊的填充金属去改变焊缝熔区的合金含量。工业纯钛和 α 合金的填充金属有时用到焊接 α - β 合金中去。利用这些填充金属可降低焊缝熔区的 β 含量,且可以改善焊缝延展性和韧性。然而,利用特殊的填充金属不能改变焊缝的热影响区。因此,脆性的焊缝热影响区在有些合金中限制了这个技术的利用。

(3) β 合金

表中只有一种 β 合金作为轧制品列出。这种合金受热处理的影响,在热处理条件下,它的机械性能受显微组织变化的影响。 β 合金中,焊态接头的延展性很强,但是其强度与这些热处理基体金属的强度比较起来仍是低的。当接头热处理时,其强度改善了,但是直到今天,这种合金的全部强度潜力在焊接应用中并未实现。同样, β 合金中的焊接接头在高温下容易变脆。然而,在 β 型合金方面的焊接研究刚开始,将来可望改善。

四、表面准备

焊接前的表面准备对于下述三点是重要的:(1)除去会使焊接接头沾污的氧化皮、灰尘和杂质;(2)在点焊和缝焊操作时,保证均匀的表面状态,从而改善焊缝的一致性;(3)在电弧焊操作时,有助于控制焊缝的孔度。

脱脂操作用到准备无氧化皮的材料,以便焊接,和用到准备有氧化皮的材料,以便去氧化皮。脱脂可以用下述方法中的任何一种来完成:

(1) 碱洗液或碱渍。这是一种组成可变的氢氧化钠的稀溶液。

(2) 酒精或丙酮洗液。当使用时,这种洗液一般应用在焊接操作刚开始前。

过去,三氯乙烯蒸汽脱脂是用得很广泛的。然而,在消除和测定应力时,焊缝熔区和热影响区的应力腐蚀裂纹起因于这种处理。三氯乙烯蒸汽脱脂应慎重使用,而且仅用在没有氧化皮的金属上,以及组件上不可能残留三氯乙烯的金属上。

酸洗处理用于净化有少量氧化皮的材料。温度直到约为 1100°F 时在钛上形成的氧化皮一般是薄的,可以由酸洗除去。最常用的酸洗液是 $\text{HF}-\text{HNO}_3$ 溶液,它含有2~4%的 HF 和30~40%的 HNO_3 。在此比例范围的 $\text{HF}-\text{HNO}_3$,酸洗时阻止大量的氢溶入。酸洗槽温度范围从室温到 140°F 。酸洗后,材料在水中漂洗,并要揩干。酸洗处理也用于点焊和缝焊作业的无氧化皮材料的准备。

在 1100°F 以上形成的氧化皮比 1100°F 以下形成的氧化皮较厚,而且用化学法除去是困难的。熔化盐槽通常用来除去这种氧化皮为焊接作准备的,此盐槽基本上是把氧化剂加到氢氧化钠中,或把氢加到氢氧化钠中组成氢化钠。使用这些熔化盐槽也需要小心控制盐浴成份和温度,以免过量的氢渗入到金属中去。同样,也用到了蒸汽喷净和喷砂等机械方法。必要时,在熔化盐槽处理和机械去除氧化皮操作之后都进行酸洗操作,以确保氧化皮的完全去除,并去除表面下的沾污金属。

作为电弧焊操作中控制孔度的一种措施,某些制造厂对要焊接的端面进行特殊处理。这些处理包括:在配合前,推锉、线刷或研磨焊接端面和附近表面;在焊接前,用丙酮或酒精清洗。

五、焊接方法

用于焊接钛和钛合金的工业焊接方法,包括惰性气体保护金属极弧焊、点焊、缝焊、闪光对焊和加压焊。在这些方法中,只有惰性气体保护金属极弧焊最受这些金属的高活度和焊缝的低杂质容许量的影响。

1. 惰性气体保护金属极弧焊

钨极和熔化电极惰性气体保护金属电弧焊方法用于焊接钛。用这些方法在焊接钛和其它金属(如不锈钢)之间的最大不同是必须采用气体保护焊,把焊件和空气隔离。在温度约为 1200°F 或更高时,焊接区域(焊缝的根部和表面)必须保护,以防止空气侵入。最关键的区域是熔焊区。空气中的氧、氮和水蒸汽扩散到熔化的钛中去是很快的,如果具有足够的量,焊缝将严重变脆。超过约 1200°F 但还不熔化的焊接区域,如果与空气接触,就要表面沾污。如果另外的焊道没有去除这些沾污表面,则沾污表面的出现在使用中可以引起过早的破坏,或引起焊接沾污。

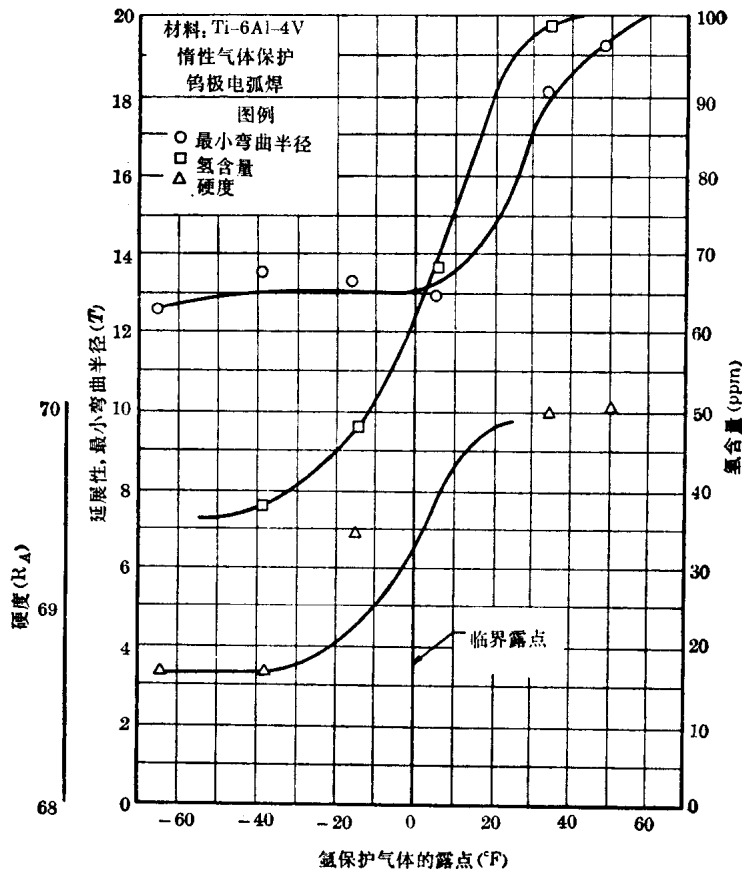


图1 钛合金焊接性能对用于焊接时氩保护气体的露点关系

(1) 保护方法

用惰性气体保护钨极和熔化电极方法来焊接钛时,最重要的是把焊件和空气隔离。这种保护是用一种高纯度惰性气体来包围焊接区而达到的。氩、氦或这两种气体的混合气用来作为这种保护气体。这些气体的焊接等级的纯度是良好的。然而,为保证纯度,大多数制造厂测量气体的露点, 0° 到 -40°F 的露点被认为是良好的。北美航空公司在测定焊接Ti-6Al-4V合金用的临界露点时所获得的数据示于图1。

用于保护焊缝的方法是完全标准化的。这种焊接有敞开式焊接和在充满惰性气体的焊接箱内焊接两种。敞开式焊接操作时,用惰性气体集中保护焊缝的表面和根部;在焊接箱内焊接时,惰性气体围绕着整个组件。

① 敞开式焊接

敞开式焊接时,为了充分保护焊缝,利用适当的设备、夹具和辅助保护装置是必不可少的。

在焊缝表面,对于熔焊熔区的惰性气体保护,主要是由气体流过焊机头或焊把上的喷嘴而达到的。配备金属或陶瓷气体喷嘴的普通焊机头和焊把可供应用。然而,特别对手工焊来说,气体喷嘴应比用于其它金属的喷嘴大。对于钨极弧焊来说,喷嘴直径最小应为 $1/2$ 吋,最好是 $3/4$ 吋;对于熔化电极焊来说,直径最小应为1吋。

在敞开式焊接操作中,适当设计的焊接夹具也是重要的。这些夹具有几个重要功能。首先,它们保持焊接零件之间的对准。第二,夹具上的下压杆或夹紧爪是用铜制成的,放在焊缝旁边作冷却器用。在焊接金属片组件时,这种冷却器对限制焊缝熔区和增加焊缝冷却速度都是有幫助的,所以容易达到良好的保护。第三,下压杆或夹紧爪作为挡板,使保护气体停留在焊接区内,并且增加从喷嘴出来的气体流动的可达范围。第四,是更重要的一点,夹具使被焊零件紧密接触固定在夹具内的垫杆。

垫杆使焊根和空气隔离。垫杆是用铜或钢制成的,所以惰性气体可进入焊缝的背面。典型的垫杆示于图2,此杆从歧管到杆表面有许多小孔,以使气体沿着杆的长度均匀流动。通常,

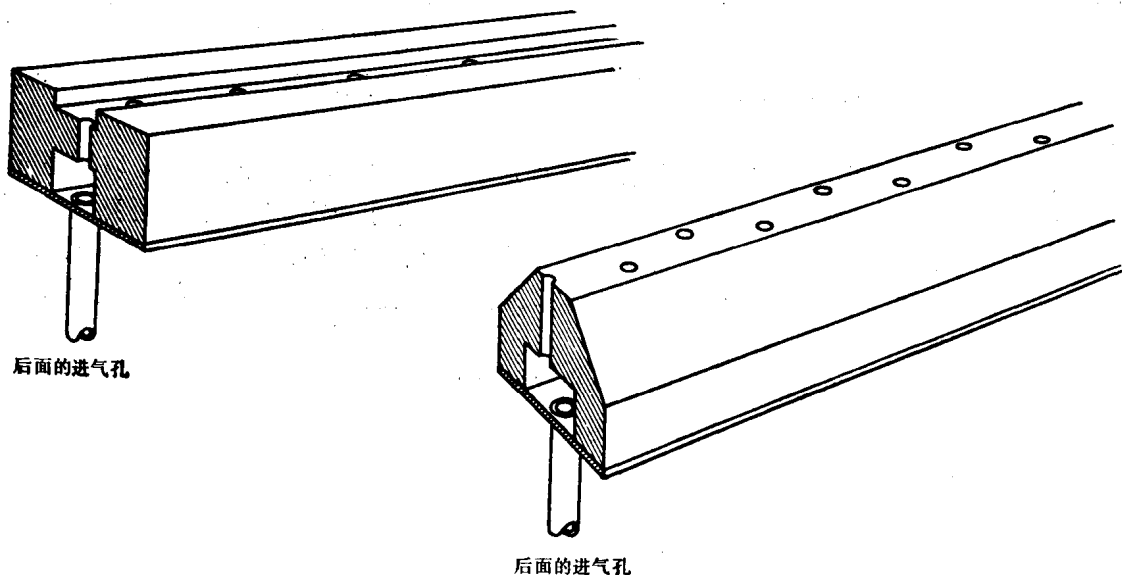


图2 钛片对焊和角焊用的垫杆
(利用歧管使气体沿着杆的整个长度均匀流动)

把多孔金属插件插在垫杆内,以使气体均匀地流到焊根。如果垫杆并不紧密配合被焊零件,则就用胶纸带来密封垫杆的边缘。然而,胶纸带使用时要小心,因为如果过热,就要使焊缝沾污。垫杆也用作焊缝的冷却器。

在焊接某些组件(如密闭容器)时,焊缝根部是不可接近的。在焊接这些组件时,容器要用惰性气体充满,以保护焊根。

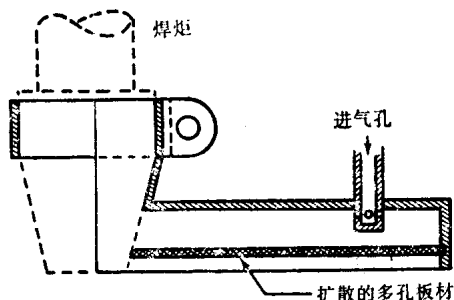


图3 用于手工焊接的拖尾罩
(用于机械焊接的拖尾罩是较长的,
且通常是用水冷)

辅助保护装置实际上常用于敞开式焊接操作,以改善保护。最普通的辅助保护装置是拖尾罩。它附在焊机头的后面,以保护冷却时的焊缝。最常用的拖尾罩的形式示于图3。此罩与位于焊把或焊机头上的气体喷嘴相连,并且有独立的气源。此罩设计得使焊炬之后焊缝之上有一层均匀的非扰动的气体。其它形式的拖尾罩已被应用到延长的气体喷嘴中。这些喷嘴必须小心地设计,以防产生扰动气流而引起焊缝沾污。

在手工和机械敞开式焊接操作时,使用合适的气体喷嘴、夹具和拖尾罩,可充分保护焊缝。然而,机械操作比手工操作更容易一致地和均匀地保护焊缝表面。因此,在焊接钛组件时,建议尽可能用机械焊接操作。

大多数手工焊接操作中,保护的效果是不一样的。这可能有几个原因。首先,手工焊接和机械焊接相比,喷嘴与工件之间的距离较长,此较长的喷嘴与工件之间的距离减少了从喷嘴流出的气体的保护区域,并增加了气流扰动的可能性。第二,在使用焊机头或焊把时,气体喷嘴与工件之间的角度不同,所以如果不小心,保护区域可能离开焊缝。第三,焊条的热端可能离开保护区域,接着就被沾污。在手工焊接中,为了使保护的效果少变化,必需对焊工进行训练。

大多数应用中,拖尾罩是用于手工操作中的唯一辅助保护装置。然而,其它的一些辅助保护装置也已用过。代替标准气体喷嘴的与钨极电弧焊把相连的瓦考(Vycor)罩,有时也被用到。这种罩比普通的气体喷嘴较长,直径较大,且几乎与被焊零件紧密接触。可能使这些罩接近于零件,因为操作者可通过罩看到电弧。同样,还使用了与焊炬相连并靠在被焊零件上面的小金属箱。

在手工操作中,许多制造厂建议,惰性气体可通过焊接夹具的下压杆而引入,以便进一步保护焊缝表面。在美国洛杉矶北美航空公司,用这种方法作了一些研究。初步研究的结果指出,至少当焊缝冷却时,保护得到了改善。气体可通过下压杆内的小孔(最好通过扩散片)而引入,以使气体流过焊缝表面。然而,需要小心操作,以防扰动而使空气进入保护气体中去。

② 焊接箱内焊接

当在充满惰性气体焊接箱内焊接时,惰性气体包围整个被焊组件。复杂的组件如果采用敞开式焊接,便要求昂贵的夹具,那就可以使用焊接箱;对于某些手工操作,为了保证均匀的保护条件,也使用焊接箱。

不同尺寸和不同设计的焊接箱可被采用。如图4所示的一种刚性焊接箱和如图5所示的一种可弯曲的塑性焊接箱已被采用。惰性气体气氛是这样得到的:在刚性焊接箱内,先抽空,再用惰性气体充满;塑性焊接箱是经好几次折叠,再用惰性气体充满,就得到所要求的气氛。在利用焊接箱时,由喷嘴供应惰性气体,以便进一步保护焊缝表面,并不断把惰性气体输送到焊接

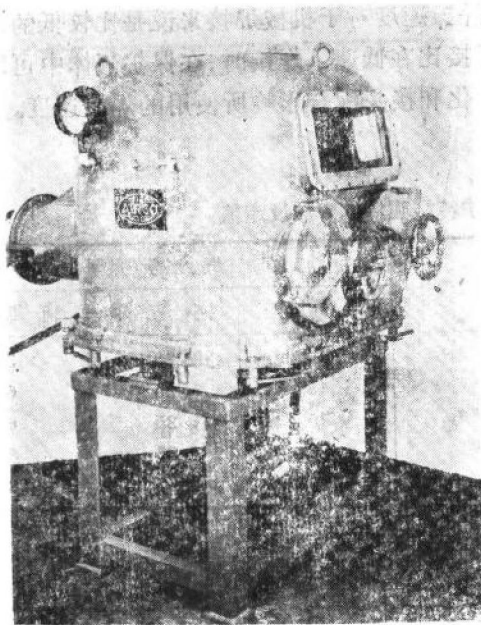


图4 刚性焊接箱

(焊接气氛是由抽空和用惰性气体充满来得到的。照片由真空技术公司提供)

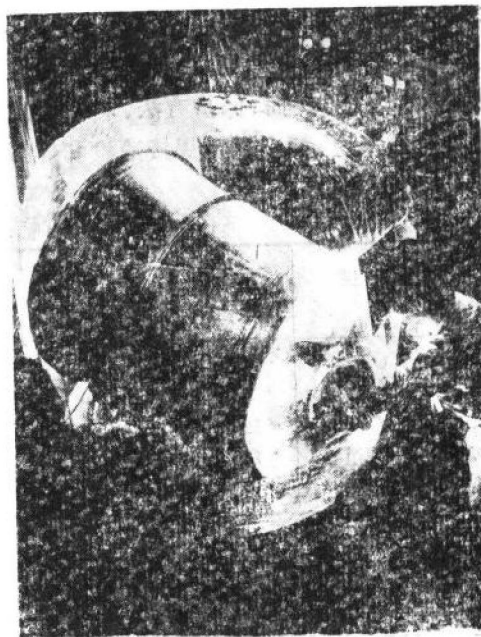


图5 可弯曲的塑性焊接箱

(焊接气氛是由几次折叠,再用惰性气体充满来得到的。照片由普拉特·惠特尼飞机公司提供)

箱内。

(2) 接头设计

钛焊件的接头设计类似于其它金属的接头设计。然而,钛的配合比其它金属的更严格,因为熔化钛有较高的流动性。通常所作的是电阻对焊、填角焊和角焊。在电阻对焊薄板时,不开坡口的方边形对接接头是通常所采用的。如果接头配合是良好的,则这些焊缝是没有用填料附加物作成的。当板材厚度超过0.06吋时,就用到了开一个坡口的单V形接头设计,以保证完全焊透。对于这些接头来说,需要填充金属附加物。对于厚板的重的零件来说,用到了单V形和双V形坡口接头。在各种情形下,接头要设计成使焊道最少,且可以接近以保护焊根。

(3) 焊接规范

钨极弧焊用于焊接厚度小于0.1吋的板材;钨极弧焊和熔化电极焊用于焊接厚度为0.1至0.25吋的板材;对于焊接厚度大于0.25吋的材料来说,就推荐用熔化电极法,以使所需的焊道数减到最少。直流、正极性(电极为负)用于钨极弧焊法;直流、反极性用于熔化电极法。

气体流率依赖于喷嘴直径和尺寸,以及拖尾罩和垫杆的设计。通过喷嘴的气体流率是重要的,因为若气体流率很低或很高的话,则气体中的扰动会使空气进入到保护罩中去。

氩是经常用于保护焊缝表面的。利用氩的气体流率比氦的气体流率低,就能得到合适的保护。然而,在弧焊中,用氦保护比用氩保护有较深的焊透度和较高的焊接速度。因此,氦或氩和氦的混合气也经常使用。混合气常用于熔化电极法。氩也用于保护焊根,但是对于这个目的,有些制造者愿意用氦。

焊机设定值依赖于金属厚度、接头设计、焊接夹具以及是手工焊接还是机械焊接。同样,对于给定的金属厚度来说,电流、电压、焊接速度和焊丝进给速度的各种组合都是可以的。因此,没有固定不变的规则能制定出所使用的焊接规范。然而,关于焊接规范的有些数据列于表2^[9]、

表 3^[10]、表 4^[10]和表 5^[11]。列于表 3 和表 4 的焊接速度对于机械焊接来说是比较低的，可以加倍。推荐用高的焊接速度，因为当在高速下焊接比在低速下焊接时，在保护气体中可以容许较多的杂质^[12]。然而，保护方法、材料厚度的变化和接头配合影响所使用的焊接速度。因此，对每种应用来说，都应规定焊接速度和焊接规范。

表2 用于手工惰性气体保护钨极氩焊的焊接设定值

材 料 厚 度 (吋)	安 培①	伏 特	电 极 尖 端	氩 气 流(呎 ³ /小时)		
				焊 炬	拖 尾 罩	辅 助 罩
0.050	60~ 70	9	20°角	10	20	3
0.070	85~ 95	9	90°角	15	25	6
0.080	120~130	9	90°角	15	25	6
0.140,第一焊道	130~140	9	平	20	25	8
0.140,第二焊道	105~115	9	平	20	25	8

①直流,正极性

表3 用于机械惰性气体保护钨极氩焊的焊接设定值

	无 填 充 金 属 附 加 物			有 填 充 金 属 附 加 物		
厚 度(吋)	0.030	0.060	0.090	0.060	0.090	0.125
电极直径(吋)	1/16	1/16	1/16~3/32	1/16	1/16~3/32	3/32~1/8
填料焊丝直径(吋)	—	—	—	1/16	1/16	1/16
焊丝进给速度(吋/分)	—	—	—	22	22	20
伏 特	10	10	12	10	12	12
安 培	25~30	90~100	190~200	120~130	200~210	220~230
喷嘴内径(吋)	9/16~5/8	9/16~5/8	5/8~3/4	9/16~5/8	5/8~3/4	5/8~3/4
主要保护罩(呎 ³ /小时)	15氩	15氩	20氩	15氩	20氩	20氩
拖尾保护罩(呎 ³ /小时)	20氩	30氩	50氩	40氩	50氩	50氩
辅助保护罩(呎 ³ /小时)	4氩	4氩	5氩	5氩	6氩	6氩
辅助材料	—	铜 或 钢		—	—	—
辅助坡口(吋)	1/4×1/16	1/4×1/16	3/8×1/16	1/4×1/16	3/8×1/16	3/8×1/16
焊接速度(吋/分)	10	10	10	12	12	12
电 源	直流,正极性	直流,正极性	直流,正极性	直流,正极性	直流,正极性	直流,正极性

表4 用于机械惰性气体保护熔化电极焊的规范

材料厚度(吋)	0.125	0.250	0.500	0.625
焊丝直径(吋)	1/16	1/16	1/16	1/16
焊丝进给速度(吋/分)	200~225	300~320	375~400	400~425
伏 特	20	30	40	45
安 培	250~260	300~320	340~360	350~370
喷嘴内径(吋)	3/4~1	3/4~1	3/4~1	3/4~1
主要保护罩(呎 ³ /小时)	50氩+15氮	50氩+15氮	50氩+15氮	50氩+15氮
拖尾保护罩(呎 ³ /小时)	50氩	50氩	60氩	60氩
辅助保护罩(呎 ³ /小时)	30氮	50氮	60氮	60氮
辅助材料	铜	铜	铜	铜
辅助坡口(吋)	3/8×1/16 或 3/16×1/16	1/2×1/8 或 1/4×1/16	5/8×1/8 或 1/4×1/16	5/8×1/8 或 1/4×1/16
焊接速度(吋/分)	15	15	15	15
电 源	直流,反极性	直流,反极性	直流,反极性	直流,反极性

表5 用于机械钨极弧焊的垫杆坡口和下压杆

材料厚度(时).	坡 口		下 压 间 距(时)
	宽 度(时)	深 度(时)	
0.020~0.032	3/16	3/64	1/4
0.032~0.040	1/4	3/64	5/16
0.040~0.064	3/8	3/64	9/16
0.064~0.072	7/16	1/16	9/16

人们往往把调整焊接规范作为控制焊缝孔度的一种方法。当遇到孔度问题时,可以增加电流,或降低垫杆和下压杆的冷却效果,来减少孔度。这些改变与良好的保护是有矛盾的,但是有时必须如此。人们常发现含铝合金比不含铝合金的孔度多,因此在焊接时把规范适当调整。

2. 点焊和缝焊

点焊和缝焊操作容易地适合于钛和钛合金的焊接。在焊机设定值的很广范围内,作出了满意的焊接,而且不需要特殊保护。对设备的要求类似于焊接钢材的,只需要精密控制焊接电流、焊接时间和电极压力。用单相焊机和三相焊机所获得的结果是差不多的。RWMA2级和3级合金被大多数制造者选用作电极材料。

点焊和缝焊的接头设计类似于用于钢的接头设计。在点焊接头上的拉伸应力在某些应用中往往是高的,把铆钉钉在接头的两端,以减少剥落。由北美航空公司规定的关于钛合金的点的间隔和最小边缘距离列于表6^[8]。

表6 最小边缘距离和点的间隔

总的接头厚度(时)	最小边缘距离(时)	最小间隔(时)
0.000~0.080	1/4	1/4
0.081~0.100	1/4	3/8
0.101~0.110	1/4	1/2
0.111~0.120	5/16	1/2
0.121~0.140	5/16	5/8
0.141~0.150	5/16	3/4
0.151~0.160	3/8	3/4
0.161~0.180	3/8	7/8
0.181~0.190	3/8	1
0.191~0.200	7/16	1
0.201~0.230	7/16	1 $\frac{3}{16}$
0.231~0.240	1/2	1 $\frac{3}{16}$
0.241~0.270	1/2	1 $\frac{7}{16}$
0.271~0.280	9/16	1 $\frac{7}{16}$
0.281~0.310	9/16	1 $\frac{11}{16}$
0.311~0.320	5/8	1 $\frac{11}{16}$
0.321~0.360	5/8	1 $\frac{15}{16}$
0.361~0.375	5/8	2 $\frac{3}{16}$

就焊缝质量而言,最重要的焊接条件是焊接电流和焊接时间。随着这些条件的变化,点焊的强度、直径和焊透度变化很大。在给定的焊接电流和焊接时间下,在控制金属飞溅、压坑和焊后板间空隙方面,电极压力、尺寸和形状同样是重要的。电流升降调节、预热、焊后加热和

锻造周期不是有规则地采用的。

即使规格相似，钛和钛合金的焊接条件变化很大。满意的焊缝似乎可利用许多设定值的组合而得到。然而，确定焊接条件的一条良好规则是利用不锈钢所用的焊接条件作为起点。在焊接钛合金所用的条件列于表7。

表7 对于 Ti-6Al-4V 板材的同样规格组合的焊接表

材 料 厚 度 (吋)	级数	电 极			焊接时间 (周期)	焊接电流 (安培)	焊点直径 (吋)	参考文献
		直径(吋)	半径(吋)	压力(磅)				
0.020	II	1/2	10	1,200	5	—	0.150	8
0.025	III	—	3	575	2	—	—	14
0.035	II	5/8	3	600	7	5,500	0.225	13
0.050	III	—	4	900	4	—	—	14
0.062	II	5/8	3	1,500	10	10,600	0.359	13
0.063	II	1/2	10	1,500	12	—	0.350	8
0.070	II	5/8	3	1,700	12	11,500	0.391	13
0.093	II	5/8	3	2,400	16	12,500	0.431	13
0.125	II	1/2	10	2,300	14	—	0.425	8

3. 闪光对焊

闪光对焊几乎专门用于焊接喷气发动机的钛环，另外还用于焊接许多原型组件，包括螺旋桨叶片和其它复杂组件。

在下述两个方面，闪光对焊比起电弧焊、点焊或缝焊来，更适合于高强度和可热处理的合金焊接。首先，熔化金属不保持在接头内，所以不出现铸造结构。第二，接头处的热金属锻粗，这种锻粗操作可以改善热影响区的延展性。

具有接近于基体金属机械性能的闪光对焊是完全在普通焊机中进行的。对于有实心横截面的接头，惰性气体保护是不需要的，但是可以使用。当使用时，玻璃纤维套把接头包起来，然后把惰性气体通到套中。对于管状接头或有空心横截面的组件接头，把惰性气体通到组件中。焊接钛和钛合金的焊机容量要求与焊接钢所要求的没有多大的不同。对于变压器容量来说，更是如此。制造钛焊接部件的锻粗压力容量不像对于钢所要求的那样高。图6^[15]和图7^[15]表示用于不同横截面积的焊接所要求的变压器和锻粗容量。然而，有一点也是重要的，即每台焊机的变压器容量要求根据零件和变压器之间的连接而有所变化。

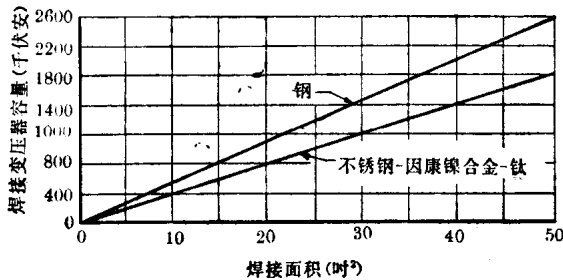


图6 变压器容量对焊接面积之间的关系

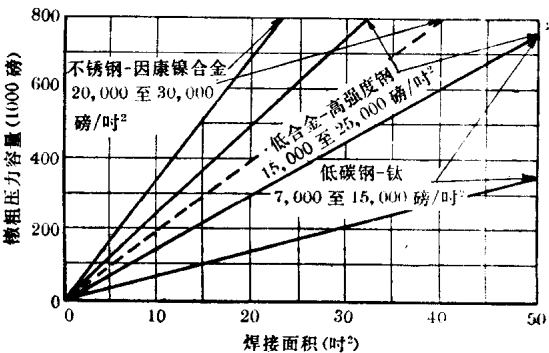


图7 最大机械锻粗压力要求对焊接面积之间的关系

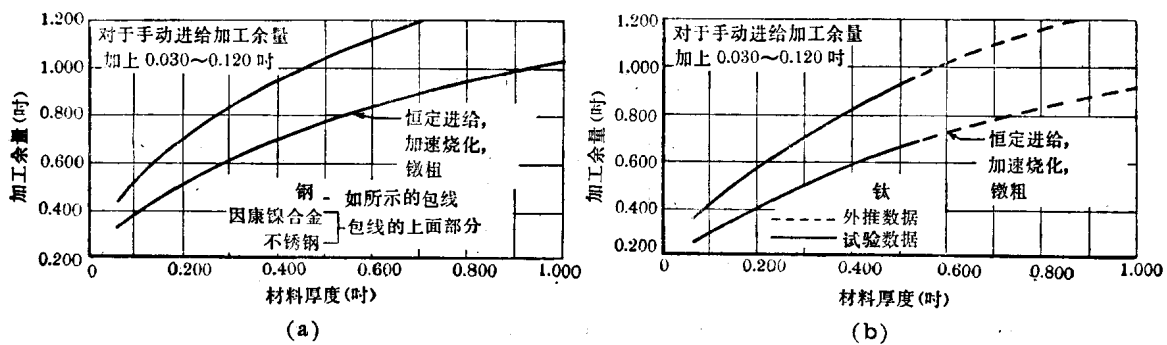


图8 总的加工余量对材料厚度之间的关系

闪光对焊的接头设计也类似于用其它材料的接头设计。对于焊接直到 1/4 吋厚的板来说，平的边缘是令人满意的；对于焊接较厚的板来说，有时把边缘稍微斜切。图8^[15]表示用于进行钛的闪光对焊时的加工余量，余量包括在闪光对焊和镦粗操作时的金属损失。

闪光对焊规范最重要的是闪光电流、速度和时间，以及镦粗压力和距离。适当控制这些变量，可能被沾污的熔化金属就不留在接头内，接头界面处的金属就处于合适的焊接温度。

一般来说，快的闪光速度和短的闪光时间用于焊接钛和钛合金。这些条件是使焊接沾污减到最少所希望的，并且这是可能的，因为这些金属的导电系数和导热系数都是低的。同样，利用抛物线状的闪光曲线比线性的闪光曲线更是所希望的，因为这样可以获得最大的焊接效率，而金属损失最少^[15]。低的到中间的镦粗压力(7,000~20,000磅/吋²)常被采用^[15]。

每台焊机和每种应用的闪光对焊变量是不同的。表8^[16]是两种钛合金都适用的一些焊接规范。焊接电流没有给出，但焊接电流和电弧电压依赖于所用的变压器抽头。

表8 闪光对焊规范

材料构造	Ti-4 Al-4 Mn, 3 吋杆	Ti-6 Al-4 V, 3 吋杆	Ti-6 Al-4 V, 1/4吋板
闪光电压(伏)	5.0	5.0	4.5
总的加工余量(吋)	0.617~0.940	0.617~0.940	0.700~0.800
镦粗(吋)	0.200~0.500	0.200~0.500	0.225~0.275
电流切断(吋)	0.150~0.100	0.150~0.400	0.205~0.255
镦粗压力(1000磅/吋 ²)	15	15	18
板厚(吋)	1.10	1.10	0.63
气体	氩	氩	氩

4. 加压焊

钛和钛合金的加压焊操作主要用于原型组件的制造。这种方法在 Menasco 制造公司用于焊接钛组件，已证明是一种满意的焊接方法，今后大概会用于更广的范围，特别是焊接高强度可热处理的合金(在这种合金的焊接中，电弧焊的延展性低)。

普通的气压焊装置用于焊接钛和钛合金是满意的。同样，焊接所用的方法与焊接钢所采用的相同，应使用封闭的接头加压焊。待焊接的零件用机械加工，在焊机内紧密接触。在整个加热周期加镦粗压力。满意的接头由类似于用到钢中的镦粗加压而得到的，压力约为 2,500 磅/吋²。实心组件的加压焊，不需要惰性气体保护。如果加压焊管子或空心组件时，一般把氩气通到空腔中，以保护焊根。

六、质量检验

钛焊接部件的质量检验方法类似于其它金属所用的。染色渗透剂和射线照相检查用于探出裂纹、气孔和诸如未焊透等其它缺陷。同样,咬边、焊透度和补强都用目视检查。另外,金相检验、机械试验和硬度试验是作为检验焊缝质量的方法。

质量检验的最大问题是确定惰性气体保护金属极弧焊中所得到的保护是否充分。典型试件的弯曲试验提供保护作用的良好标准。无损检验不及所希望的那样可靠。

广泛地用于评价焊缝沾污的无损检验方法是观察表面状态。如果焊接是在严密的控制条件下作的,则这种方法是完全可靠的。条件是否严密控制的一个标记是看给定焊缝或几个类似焊缝的表面状态之变化。如果观察到了大的变化,就需要较好的控制。

在用表面状态来评价焊缝沾污之前,先在焊接操作中遇到的条件下,制作不同表面状态的焊缝,然后对这些焊缝作延展性试验。通常发现,带有模糊的白色、灰色或黄色氧化皮的焊缝表明是过份沾污的。用更充分的保护时,焊缝表面会有鲜明的金属蓝色或金黄色的状态,或其混合色。这些颜色仅表示表面沾污,而焊缝通常是良好的。如果焊缝具有新近抛光的银色状态,这就是一种接近于完全保护的表示。然而,如果熔池周围的保护不充分,但在凝固焊缝上的保护是良好的,则会产生带此种状态的沾污焊缝。同样,良好的焊缝表面状态并不表示基体金属或填充金属在焊接操作开始前无过份沾污。

在焊接箱内操作中,在开始焊接一个组件,然后焊接试件之前,焊接弯曲试验试件检验焊缝保护作用。如果这些弯曲试件是良好的,这就假定组件内的焊缝是良好的。同样,在焊接组件中,如果焊缝变色了,则焊接弯曲试验试件,以测定焊接箱内的气体是否过份沾污。

焊接的质量检验应从进料开始。对要用作焊接组件的材料进行焊缝试验,将保证基体金属和焊条在预定的应用中是良好的。

七、补 焊

惰性气体保护金属极弧焊法可用于补焊。最普通的补焊缺陷是多孔电弧焊缝、未焊透电弧焊缝以及基体金属或焊缝中的裂纹。在作补焊时,缺陷首先用金属的或磨料切割装置除去,然后把补焊区域弄清洁,用通常的步骤进行焊接。

补焊用于钛组件上比其它金属组件上来得少。因此,在作补焊之前,缺陷的原因应确定,补焊就没有缺陷了。裂纹是由过度焊接或表面沾污、过量剩余应力或应力腐蚀所引起的。如果是由于沾污引起的,则所有的沾污金属应在补焊前去除。如果是由于剩余应力引起的,则零件应在补焊前消除应力。同样,在补焊区域可能需要缴粗材料,以提供过量金属允许作焊缝收缩。如果补焊是由于沾污或应力腐蚀所要求的,除非确定缺陷的区域,零件就不可补焊。

八、消除应力

消除应力操作通常用于制造复杂的焊接组件。消除应力减少剩余焊接应力,增加尺寸稳定性。消除应力是在零件加工完成后作的,但有时也在生产的不同阶段完成的。有关消除应

力的退火时间和温度的数据在表9^[10]中给出。1000°~1200°F的最小消除应力温度对于短时处理是需要的,有些制造厂甚至使用比表中所列的温度更高,时间更短。当使用高的消除应力温度时,则清洗零件困难。在前面略述的清洗程序是用在消除应力处理之后的。

测定应力操作列入到用于复杂焊接件的制造方面的生产工艺中去。测定应力操作是在消除应力操作范围内的温度下完成的。

表9 消除应力的退火温度和时间

额 定 成 份(重量百分比)	消 除 应 力 的 温 度(°F)	消 除 应 力 的 时 间(小时)
工业纯钛	800	8
	900	3/4
	1000	1/2
Ti-5 Al-2.5 Sn	900	20
	1000	6
	1100	2
	1200	1
Ti-6 Al-4 V, 退火	900	20
	1000	2
	1100	1
Ti-6 Al-4 V, 溶液处理	900	15
	1000	4
Ti-6 Al-4 V, 溶液处理和时效	900	15
	1000	5

九、焊接接头的机械性能

对于焊接应用来说,选择钛合金最重要的标准是焊接接头的机械性能。有些合金可适合于各种焊接应用,另一些合金仅可适合于一种或二种焊接应用。为了使这问题的数据介绍容易些,下面的讨论按焊接的类型,有时按合金的类别来进行。

1. 惰性气体保护金属极弧焊

弧焊是根据室温和高温拉伸特性、弯曲延展性和缺口韧性来评价的。大部分可利用的拉伸试验数据是从金属板试件上得到的,在这些试件中,焊缝是垂直于试件的最大应变方向。这些试件提供了焊接接头效率的良好标准,但并不提供焊缝延展性的精密标准。

(1) α 合金

α型钛合金的额定成份、基体金属拉伸特性、弯曲特性、焊接接头效率和弯曲延展性列于表10中,这些数据是从退火的基体金属和焊接接头中得到的。接头是不用填充金属作成的,或用如基体金属相同成份的填充金属作成的。

Ti-5Al-2.5Sn 合金焊接部件的高温拉伸强度示于图9^[17]。这些接头是在验收态(轧制退火)基体金属中作成的,并在焊态条件下试验的。所有的破坏都发生在基体金属中。

弧焊接头方面的疲劳强度数据是有限的。在波音飞机公司, Ti-5Al-2.5 Sn 板的弧焊在