

钛及钛合金的特性

1 机械性能

钛熔点 1688℃，相变点温度 885℃，相变温度以下为密排六方晶格的 α 相，相变温度以上为体心立方晶格的 β 相。比重 4.54，为钢的 60% 左右，纵弹性系数 10850 kg/mm^2 ，是钢的 1/2 左右。钛及钛合金在极低温和高温下能进行显著的锯齿状变形。根据这样的特征，把钛合金的性能按其显微组织分为 α 相、 $\alpha + \beta$ 相及 β 相，并叙述温度对拉伸性能的影响。

(1) 钛合金的热处理

钛合金大致分为热处理型和非热处理型，从金相组织上前者为 $\alpha + \beta$ 相和 β 相，

后者为 α 相。 α 相合金把 Al 和 Sn 等作为主要合金成份，采用退火及消除应力退火。钛合金由 β 相急冷产生马氏体转变，生成 α' 相。由于 α' 相硬度不太高，和钢比较对机械性能影响不大。在 $\alpha + \beta$ 相合金中， β 相多的情况下，加热至 $\alpha + \beta$ 相区的温度，得到 $\alpha + \beta$ 相等轴组织后进行水冷。这时生成的残留 β 相在比硬而脆的 ω 相析出温度高的温度下分解，形成微细的 $\alpha + \beta$ 组织。 α 相多的情况，由 β 相淬火得到 $\alpha' + \beta$ 组织，把它们再加热使 β 成为微细的 $\alpha + \beta$ 组织。 β 相合金由于淬火马氏体化，残留的 β 加热到高于 ω 相析出温度，使之析出微细的 α 相。表 1 为具有代表性的钛合金的热处理和拉伸性能。

表 1 典型钛合金的热处理和常温拉伸性能试验值

合 金		热 处 理 条 件	形 状	拉 伸 试 验 值		
相	主要合金成份 (%)			拉伸强度 (kg/mm^2)	屈服强度 $Q_{0.2}$ (kg/mm^2)	伸长 (%)
α	5Al-2.5Sn	退火 (719℃ 1 小时空冷)	板	87.5	84.0	18
	8Al-2Nb-1Ta	退火 (899℃ 1 小时空冷)	棒	88.2	84.0	17
	8Al-1Mo-1V	热处理 (980℃ / 1 小时空冷 + 524℃ / 1 小时空冷)	板	102.9	94.5	16
$\alpha + \beta$	6Al-4V	退火 (760℃ 2 小时空冷)	板	94.5	84.5	11
		热处理 (927℃ / 20 分水冷) + 524℃ / 8 小时空冷	板	119.0	105	7
	4Al-3Mo-1V	热处理 (885℃ / 2.5 分水冷)	板	98.0	66.5	15
		热处理 (885℃ / 2.5 分水冷 + 482℃ / 16 小时空冷)	板	136.5	116.9	6
	7Al-4Mo	退火	棒	112.0	105.0	15
	热处理 (899℃ / 20 分水冷 + 482℃ / 16 小时空冷)	棒	133.0	122.5	12	
	8Mn	退火 (704℃ / 1 小时空冷)	板	96.6	87.5	15
β	13V-11Cr-3Al	热处理 (760℃ ~ 815℃ / 15 ~ 30 分空冷)	板	94.5	91.0	16
	(B120VCA)	热处理 (760℃ / 30 分空冷 + 482℃ / 12 小时空冷)	板	126.0	119.0	6

(2) α 相钛合金

图1是纯度99.2% (Ti-55) 及98.5% (Ti-70) 两种金属钛在室温以上时拉伸性能随温度的变化。而图2为纯度99.0% (Ti-40) 的金属钛在室温以下时拉伸性能随温度的变化。比较二种纯度的金属钛的室温拉断强度和屈服强度可见, 前者为 35~60 kg/mm², 后者为 30~55kg/mm², 因此很清楚, 纯度的影响是很大的。

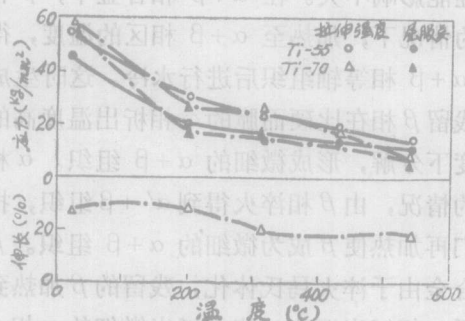


图1 纯钛高温拉伸性能与温度的关系

高温区在 200℃ 以下强度的降低显著, 200℃ 以上强度降低较小。由于所列举的试样材料的纯度不好, 所以要考虑到动态变形时效的可能性。低温拉断强度从室温的 30kg/mm² 左右提高到 -269℃ 的 100 kg/mm² 左右, 增大约 3 倍。由于屈服强度的增加比拉断强度的增加小得多, 所以低温加工硬化的程度很大。伸长率、断面收缩率等塑性指标一度增加后在极低温度下又稍稍降低, 但在全温度范围内表现有较好的塑性。在 -100℃ 以

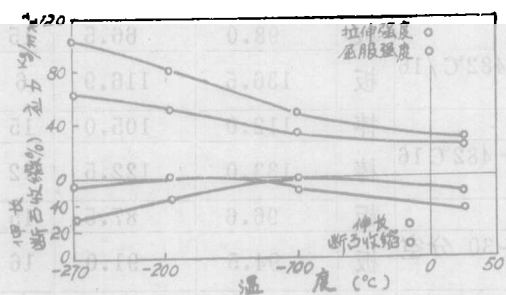


图2 纯钛的低温拉伸性能和温度的关系

下的温度区域, 断裂部附近出现变形双晶, 然而在应力-变形曲线上成为明显的锯齿状曲线 (以下称作锯齿形) 只是在 -269℃。在这个温度随塑性变形的加大, 锯齿的振幅增大, 大的锯齿振幅与小的锯齿振幅交互发生直至断裂。不是韧性破坏。

图3是 Ti-5Al-2.5Sn 合金的拉伸性能随温度的变化。此合金在室温保持 80~100kg/mm² 的强度, 在全温度范围内保持

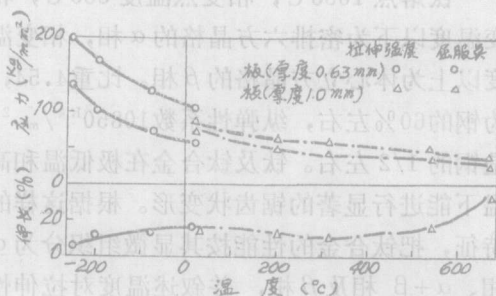


图3 钛合金 (Ti-5Al-2.5Sn) 低温和高温拉伸性能和温度的关系

有很好的韧性, 且焊接性能也很好。一直到 500℃ 附近表现了高的蠕变强度。这个合金, 在 C、N、O 等侵入型固溶原子特别低时, 被用在极低温度下使用的机器上, 在 -253℃ 还保持有高的强度和韧性。

图4是 Ti-8Al-1Mo-1V 合金的拉伸性能随温度的变化。这个合金是作为高温用而开发的, 在 α 及 $\alpha+\beta$ 相合金中, 高温强度和蠕变强度是最高的。且通过两段退火, 低温韧性也很好。

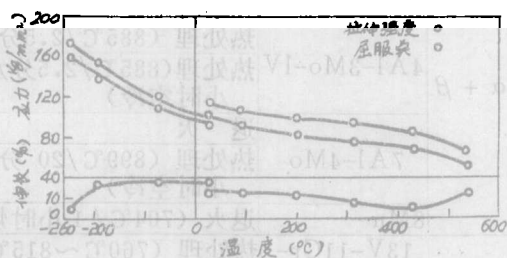


图4 钛合金 (Ti-8Al-1Mo-1V) 的低温和高温拉伸性能和温度的关系

(3) $\alpha + \beta$ 相钛合金

图5是 Ti-6Al-4V 合金的拉伸性能随温度的变化。0.6mm 厚的板于910℃保持10分钟后水冷,500℃ 4小时回火。 ϕ 25.4mm 试样于940℃保持1小时后水冷,480℃ 8小时时效处理。此合金为典型的 $\alpha + \beta$ 相钛合金,被广泛应用。室温拉断强度为 120~150kg/mm²,到400℃的高温还保持有 80~100kg/mm² 以上的高强度。低温强度超过 200kg/mm²,但在 -150℃ 以下其韧性的降低是很显著的。

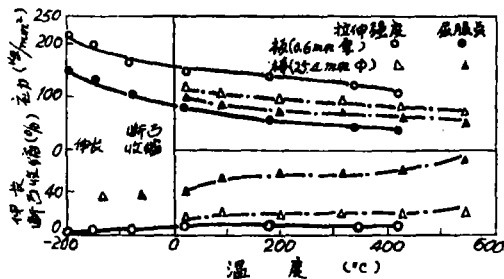


图5 钛 (Ti-6Al-4v) 的低温和高温的拉伸性能和温度的关系

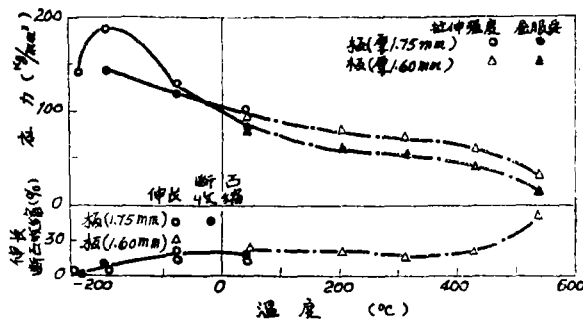


图7 钛合金 (Ti-8Mn) 的低温和高温的拉伸性能和温度的关系

(4) β 相钛合金

图8是 Ti-13v-11Cr-3Al合金的拉伸性能随温度的变化。这个合金室温拉断强度 130kg/mm²,屈服强度 120kg/mm²,在 400℃ 以下有较高的屈服比。考虑比强度,在这个温度范围内比 4340 钢(Ni-Cr-Mo 钢)、不锈钢、铝合金都优越。

图6是 Ti-4Al-3Mo-1V 合金的拉伸性能随温度的变化。热处理规范为 900℃ 保持2.5分钟水冷,480℃ 12小时时效。室温具有 140kg/mm² 的强度,加工性非常好。以薄板、条、厚板等形式应用。

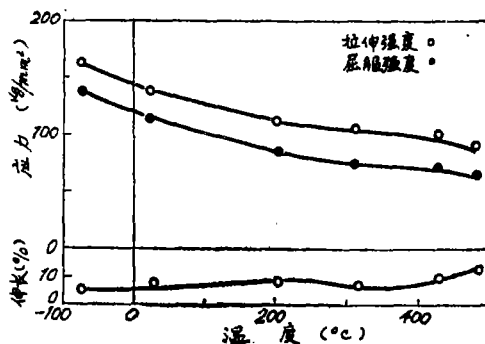


图6 钛合金 (Ti-4Al-3Mo-1v) 的低温和高温拉伸性能和温度的关系

图7是 Ti-8Mn 合金的拉伸性能随温度的变化。热处理规范为 704℃ 保持1小时后以150℃/小时速度冷却。加工性能好但焊接性能不好,一般以退火状态应用。

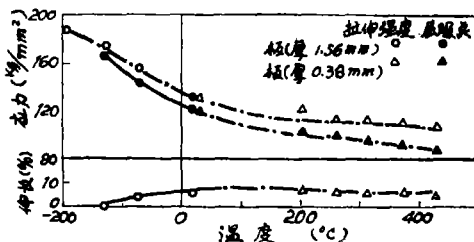


图8 钛合金 (Ti-13v-11Cr-3Al, B120VcA) 的低温和高温拉伸性能与温度的关系

2 耐 蚀 性

钛、钽、锆等新金属材料的问世已经过了二十多年，这些金属目前业已成为工业材料的一个方面。其中钛及钛合金，由于耐腐蚀性好和轻而强的特点，作为化学工业用耐腐蚀材料和宇航用材料取得了很大成绩，可以予想，今后会有更大量的使用。

(1) 钛的耐蚀性概述

钛在氧化性、中性及有腐蚀抑制剂存在的还原性环境中对于腐蚀及局部腐蚀具有出色的耐蚀性。钛在强还原性酸或醋酸盐中被腐蚀。而在弱还原性环境中保持钝化态。在更高温度下也具有耐蚀性。因此，钛在高温盐类、含水氯气、硝酸、醋酸等腐蚀性环境中被广泛利用。

为改善钛的电气特性，用白金和贵金属氧化物进行表面镀层，这样即可用在食盐电解的阳极海水直接电解装置用阳极，阴极腐蚀及燃料电池等方面。在制碱工业中电解用阳极已采用金属钛代替石墨。

钛在海水中不可避免的要有微生物的污染附着，但附着物下面没有发现孔蚀及狭缝腐蚀，钛上的附着物很容易去除。因此，钛作为海水用传热管，特别是原子能、火力发电站的冷凝器及海水淡化装置用的传热管材料，代替铜合金管被广泛的采用。

钛的耐蚀性一般是由于钛的表面形成了氧化膜。这个氧化膜很坚固且破损后立即又形成。此氧化膜在 315°C 以下对腐蚀及剥落那样的机械损伤仍能起保护钛的作用。超过 315°C 氧化膜逐渐变坏，在高温时钛表面形成氧化皮，金属脆化。

以上概述了钛的耐蚀性，和不锈钢、锆比较，特别在电化学方面，钛耐蚀性的特点有以下三点：(i) 钝化区宽 (ii) 钝化容易 (iii) 抗氯离子皮膜破坏作用强。

下面加以说明。

(2) 由电化学方面看钛的耐蚀性

(i) 钝化区宽

钛和不锈钢一样由于其钝化态使之在硝酸铬酸等氧化性环境中具有出色的耐蚀性，而且由于其钝化态比不锈钢更安定、钝化区宽，所以对于一些耐蚀材料抵不住的高温高浓度的硝酸、湿润氯气、氯水、各种漂白剂等也显示了出色的耐蚀性。象图 9 所示那样，在常温 10% 硫酸中，不锈钢在 1.0V 附近开始了所谓过钝化态腐蚀，而钛在 -0.1V

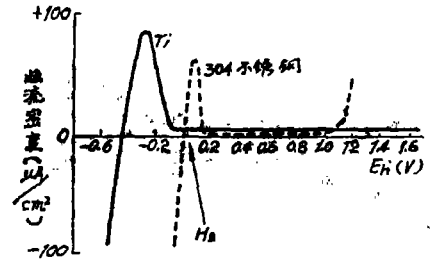


图 9 10% 硫酸中钛和 304 不锈钢的极化曲线 (35°C)

附近则成为钝化态，至少数伏内不发生过钝化态腐蚀。而且，在 -0.1V 附近进入钝态区，从热力学方面说明，由于非氧化性酸中存在大量氢离子的氧化作用，可使之钝态化，这和以前的耐蚀合金比较是一个重要的特性，而实际上由于钛表面的氢过电压大，在纯粹的非氧化性酸中通常不产生钝态化。

但是，白金和钯的氢过电压较小，在与钛形成电化学连接状态时，钛则阳极钝化，因而不受腐蚀。像钝钛都不能使用的非还原性酸中， 0.2% Pd-钛合金却很耐蚀，根据这个原理开发了这种合金。

(ii) 钝态化容易

钛在盐酸、硫酸、氢氟酸、磷酸、醋酸、蚁酸等的非氧化性酸中由于不能钝态化，被强烈的腐蚀，但象图 10 及表 2 所示那样，由于极微量的金属离子和氧化剂的作用很容易形成钝化态，腐蚀即停止，只有氢氟酸例外。

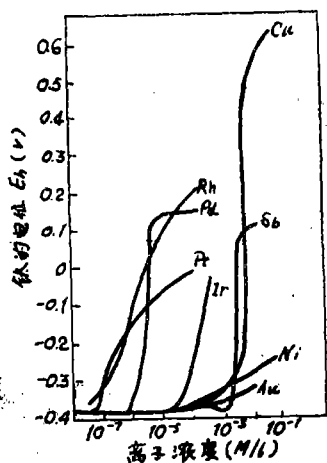


图10 在沸腾2M盐酸中，微量金属离子对钛的电位的影响

表2 氧化性物质对于钛的腐蚀的抑制效果

溶 液	抑制剂量 (%)	腐蚀率 (mm/年)		
		CuSO ₄	Cr ₂ O ₃	HNO ₃
5% HCl 194°C	0	6.9	6.9	6.9
5% HCl 194°C	0.05	0.09	—	—
5% HCl 194°C	0.5	0.06	0.03	—
5% HCl 194°C	1.0	0.06	0.03	0.09
5% HCl 194°C	5.0	0.06	0.03	0.09
10% HCl 沸腾	0	—	—	60
10% HCl 沸腾	5.0	—	—	0.11
15% H ₂ SO ₄ 沸腾	0	—	—	90
15% H ₂ SO ₄ 沸腾	5.0	—	—	0.03
50% H ₃ PO ₄ 沸腾	0	—	60	60
50% H ₃ PO ₄ 沸腾	5.0	—	0.18	0.15

(iii) 钝化态抗氯离子的皮膜破坏作用强

氯离子对于钛、不锈钢、镍合金、铝合金等的钝化膜的局部破坏作用很强，因此引起孔蚀或应力腐蚀裂纹。但是，由于钛的钝化膜不被氯离子所破坏，对于氯化物水溶液，钛的耐蚀性很出色。

钛在3%盐水中发生腐蚀的电位在+0.35V左右，比钛低，如图11所示。

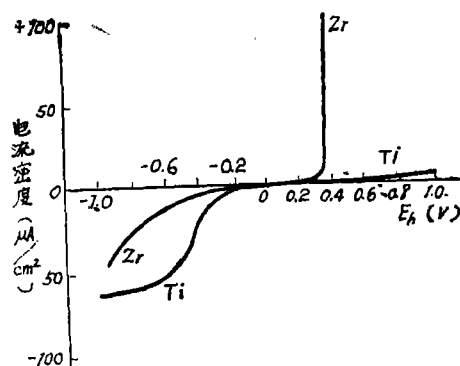


图11 3%食盐水中钛及锆的极化曲线(35°C)

(3) 钛在使用时要注意的各种溶液环境

(i) 硝酸

在高温高浓度的硝酸溶液中钛有时会发生全面腐蚀，此时使用5% Ta—Ti合金为好。

(ii) 海水及中性盐

在海水环境中及中性氯化物溶液中钛很难发生腐蚀和孔蚀，而作为例外，在氯化铝、氯化镁、氯化铜、氯化锌、氯化锰的沸腾溶液中发生孔蚀。而且在90°C以上的海水中可能发生狭缝腐蚀。对于这些情况建议使用0.2% Pd—Ti合金。

(iii) 炭氢化物

炭氢化物不腐蚀钛，含氯和氟的炭氢化物也不腐蚀钛，但在有水存在时水分解生成盐酸或氢氟酸则钛被腐蚀。而且要注意，高温分解产生的氢会被钛吸收。

(Vi) 气体

干燥的氯气腐蚀钛，而含1%以上水分的湿润氯气和氧化性气体，例如亚硫酸气体，碳酸气硫化氢等不腐蚀钛。而且在-252.8°C至93.3°C的温度范围内对于氢是完全耐蚀的。对于过氧化氢也很耐蚀。但在气态氧和液态氧中不推荐使用钛。如果发生开裂和破断，新的钛表面出现，和氧接触，即使在低温低压下也能使钛燃烧，且反应一旦

表 3 钛的化学成份

类 别	H	O	N	Fe	Ti	备 考
KS-40	0.010以下	0.20以下	0.05以下	0.20以下	余 量	相当JIS (TP28)
KS-50	0.010以下	0.20以下	0.05以下	0.25以下	余 量	相当JIS (TP35)
KS-70	0.010	0.30以下	0.05以下	0.40以下	余 量	相当JIS (TP49)

表 4 工业用纯钛的机械性能

类 别	拉 伸 性 能			弯 曲 性 能		硬 度 (Hv)	备 考
	拉断强度 (kg/mm ²)	屈服强度 (0.2%kg/mm ²)	伸长率 (%)	弯曲 角度	内侧半径		
KS-40	>28	>17	>27	180	板厚的 2 倍	>100	相当 JIS 1
KS-50	>35	>25	>23	180	板厚的 2 倍	>110	相当 JIS 2
KS-70	>49	>35	>18	180	板厚的 2 倍	>150	相当 JIS 3

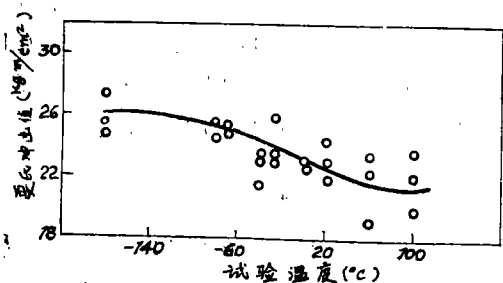


图 13 纯钛 (KS-50) 的低温冲击值

(1) 钛的焊接性

钛的高温与 O、N 等气体的亲和力极大，由于吸收了这些气体明显地硬化和脆化，并且这些气体是在焊接金属中产生气泡的直接原因。因此当焊接时，为排除气体的污染有必要把焊接部位完全保护起来。

因此，通常焊接钢使用的焊条药皮复盖的焊接、隐弧焊接等不能使用，而多采用专门的 TIG 焊接、MIG 焊接等，用惰性气体保护焊接部位。根据情况，不只把焊接部位保护起来进行焊接，也有在充满氩气的容器中进行焊接的。

另外，焊接时只要保护得好，因钛的热膨胀系数比较小，且高温时具有一定塑性，就不易产生开裂。并且由焊接热引起的变形

也比铝和镁小。钛的耐蚀性良好，应力腐蚀和点蚀、晶界腐蚀等几乎没有见到，焊接部位的耐蚀性，认为与其母材基本上是相同的。就这点来说，钛可以说是焊接性良好的金属。

但象前述那样，一旦吸收大气的气体，焊接部位的性能将显著恶化。

图 14 表示 Ar 保护气体中混入杂质时，

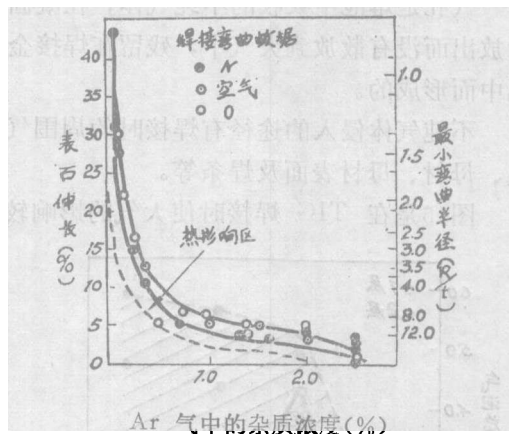


图 14 表面污染对纯钛薄板焊缝弯曲性质的影响 (TIG 焊接)

板厚: 1.219mm (C: 0.5%, O: 0.099%, N: 0.02%, H: 0.015%, Fe: 0.17%, $\sigma_{0.1}$: 40.5kg/mm², σ_B : 43.4kg/mm², ϕ : 32%, 弯曲伸长: 55% M. B. R: 0.55)
 焊接条件: 焊接电流: 37A, 焊接速度: 152.4mm/分 (+ M. B. R = 不产生开裂时的可能最小弯曲半径/板厚)

进入焊接金属中的不纯气体对弯曲塑性的影响。可知 Ar 气中即使有极少不纯气体的存在，也会显著使弯曲性能恶化。

钛焊接时，不纯气体不仅从熔池直接进入，而且也从由于电弧热传导变成高温部分吸收。因此，焊接部位（包括特别高温的焊缝）直到变为低温（例如 500℃）以前，必须供给充足的保护气体。

另外，使焊缝性能下降的杂质不仅从大气进入，也从坡口及焊条进入，因此焊前这些部分有必要清理干净。

坡口表面清理：①由 HF—HNO₃ 酸洗；②用碱水洗净；③用有机溶剂脱脂；④用不锈钢刷子刷等，而一般采用②、③的方法。由砂轮打磨易粘着磨料，反倒不好。

钛焊接时，最成问题的是由不纯气体引起的焊缝性能的劣化和在焊接金属中产生气孔。

由不纯气体引起的性能劣化，可用焊接时的保护及清理干净坡口来防止，而关于气孔有更多的影响因素，要解决它们是非常困难的。

气孔是熔池中吸收的不纯气体，在凝固时放出而没有散放到大气中，残留在焊接金属中而形成的。

不纯气体侵入的途径有焊接时的周围气氛、母材、母材表面及焊条等。

图15是在 TIG 焊接时使大气的的影响较

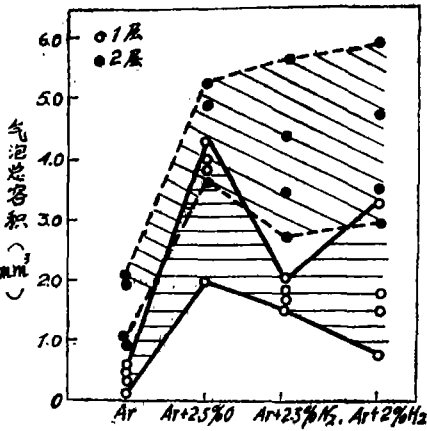


图15 气氛对气泡的影响 (TIG 焊接)

小的状态下，从焊炬向保护气体中混入不纯气体而形成气孔的试验结果。

在 Ar 气中也有气孔发生，虽然试验结果比较分散，但混入不纯气体后气孔显著增加。在这里，O、N、H 都有恶劣的影响，而在 MIG 焊接中，也有试验结果说明，N、H 几乎没有影响，只 O 有恶劣的影响。

另外，母材和焊条上的污垢（油，氧化膜），母材中的 O₂ 等也是增加产生气孔的主要原因。

焊接条件不同，气孔产生的程度有所不同，但其倾向，根据焊接方法并不一定。

熔池的大小和达到的最高温度可能影响不纯气体的吸收，而其后的冷却速度可能影响气孔的封闭。怎样的条件是防止气孔最适宜的条件，可能根据焊接方法、电流、电压、速度、母材的组成、板厚、焊条的组成，以及保护方法的不同有所不同。在实际焊接时对以上各项有必要加以考虑。

(2) 焊缝的性能

钛的机械性能，几乎不受热处理及显微组织的影响，因此，即使受到焊接热的影响，只要不受不纯气体的污染，其机械性能几乎不改变。

焊条用和母材同一成份的。虽然是气体保护焊接，焊接金属也要受若干大气污染，硬度和强度上升，塑性、韧性稍稍下降，但作为结构件，其焊缝还算具有良好的性能。

表 5、图16、图17是焊缝的机械性能以及韧性和疲劳强度，而图18是焊缝的硬度分布。

表 5 钛的焊缝的拉伸性能

种 类	0.2屈服极限 (kg/mm ²)	拉断强度 (kg/mm ²)	伸长 (%)	断面收缩 (%)
KS 50 母材	27.5	36.2	46	76
KS 50 焊缝	36.3	43.5	44	70
KS 70 母材	49.9	50.6	34	53
KS 70 焊缝	49.1	58.9	25	42

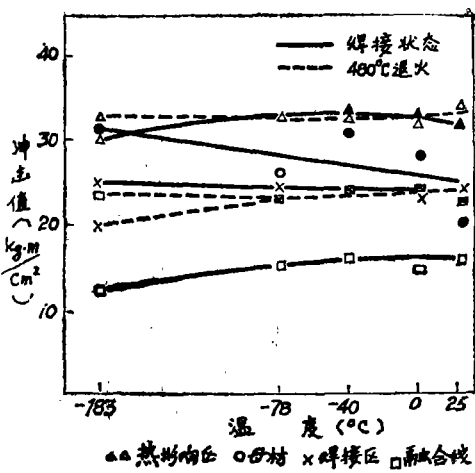


图16 钛 (KS-50) 的焊接区冲击值

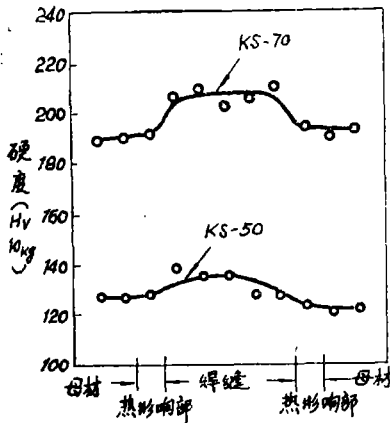


图18 纯钛焊接区的硬度分布

4 塑性加工性能

关于钛的塑性加工性的全面考虑，可参
表7 压力加工弯曲加工限度

材	料	晶粒方向	弯曲温度 °F	弯曲角 极限 α°	最小弯 曲半径 (R/T) _{min}	弯曲加工界限 (R/t)						
						弯曲角 (α)						
						30	45	60	75	90	105	120
钛合金 (6Al-4V)	L/T	室温	68	5.70	2.05	4.20	5.50	5.70	—	—	—	—
时效硬化型 钛合金 (TiCr-3Al)	L/T	室温	105	2.40	0.34	0.68	1.16	1.80	2.25	2.40	—	—

- 注 1) 晶粒方向的L表示长的方向，T表示横向
2) 首先确定弯曲角α，板厚t及弯曲方向(L或T)
3) 弯曲角界限的研究
(a) 予先给予的弯曲角度比弯曲角度极限大的时候，弯曲加工界限和最小弯曲半径(R/t)_{min}同值。
(b) 给予的弯曲角度小于弯曲角度极限时，由表内值的补插值求得弯曲加工界限(R/t)值。
4) 由上述方法求得的R/t，决定弯曲半径R。

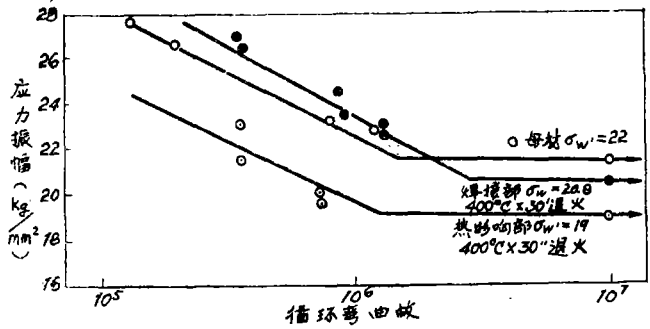
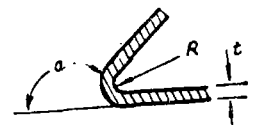


图17 钛 (KS-50) 的焊接部疲劳S-N
曲线

照结构钢。

钛在880°C以下是密排六方晶格的α-Ti，作为一次制品的棒、板的压延及各种挤压成形也比较容易。但作为耐蚀、耐热且高强度的结构材料而被开发的Ti-Al、Ti-V系合金，高温比强度极好，而伸长率小，在冷变形时，它们的加工限度是很低的，这是一个缺点。为此，形状复杂及有高加工度要求的另件的成形，要进行加热成形。纯Ti板的法兰成形、拉伸成形及深冲在1000°F；Ti-6Al-4V合金板的深冲在1200°F；A-110 (Al5%，Sn2.5%)的深冲在1200°F；自由锻成形在1100°F等，其良好结果已有报告。

关于室温下板材成形的加工限度列举于表6~表9。

表 6 成形性试验值

材 质	结晶规格	杯突值	* L D R	压 延 方 向				45° 方 向				直 角 方 向				平 均 值								
				屈服强度 (kg/2) (mm ²)	抗拉强度 (kg/2) (mm ²)	屈服比	伸长 %	r 值	n 值	伸长 %	屈服比	r 值	n 值	屈服强度 (kg/2) (mm ²)	抗拉强度 (kg/2) (mm ²)	屈服比	伸长 %	r 值	n 值	屈服强度 (kg/2) (mm ²)	抗拉强度 (kg/2) (mm ²)	屈服比	伸长 %	r 值
钛(O材)	α-六方晶	11.32	4531	137.70	337.30	30.82	33.50	0.102	25	30.82	33.50	0.122	0832	438.408	483.00	121	6131	0.37	70.82	34.00	112	01	-0.15	
钛(H材)	α-六方晶	7.51	9148	962.70	7824.50	0.140	6256.561	80.91	24.50	0.111	2862	669.80	9021	0.015	1.51	56.164	0.00	8823	70.13	1.17	-0.22			
Ti+5%Al +2.5%Sn	α-六方晶	2.01	3875	680.00	9414.00	0.072	4677.679	0.08	10.5	0.051	4176	876.80	9616	5.005	2.46	76.979	40.97	12.90	0.051	94	1.05			
Ti+6%Al +4%V	α/β六方晶 体心立方	4.41	3693	897.20	9712.0	0.051	0988.488	90.99	11.5	0	1.69	94.094	0100	14.5	0	1.44	91.192	30.99	12.40	01	1.48	-0.43		
Ti+2%Cu	α-六方晶	7.12	0050	662.30	8123.00	0.131	3252.259	0.08	24.00	0.132	0755	860.10	9323	50.122	38	52.760	10.88	23.40	131	96	-0.22			
Ti+15%Mo	β体心立方	8.423	459	874.78	8037.00	0.091	4159	675.30	79	36.00	241	56	61.477	90	79	31.00	291	43	60.175	70.79	35.00	22	1.49	-0.14

* LDR 极限深冲系数

表 9 深冲加工限度

材 料	温 度 (°F)	比	破断限度直径比 (Do/dp) 破断限度高度比 (H/dp)									
			比 dp/t									
			25	50	100	150	200	250	300	350	400	500
钛 合 金 (6Al-4V)	RT	Do/dp	1.7	1.7	1.7	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2
		H/dr	0.47	0.47	0.47	0.31	0.24	0.24	0.24	0.17	0.17	0.11
钛 合 金 (13V-14Cr-3Al)	RT	Do/dp	1.7	1.7	1.7	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2
		H/dp	0.47	0.47	0.47	0.31	0.24	0.24	0.24	0.17	0.17	0.11

注 RT 表示室温 (冷间变形)

1) 先由给定的条件计算出 dp/t

2) 查表由 dp/t 用内插法求出 Do/dp, H/dp, 其 Do/dp 乘以 dp, 求得 Do, H/dp 乘以 dp 求得 H

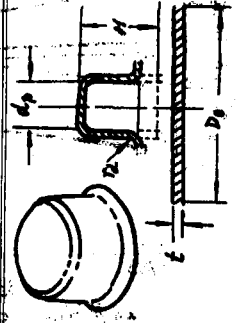
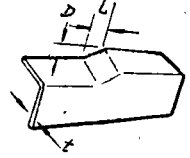


表 8 台阶成形限度

材 料	界限比	破断限	压 曲 极 限 (D/t)							
			D/L							
	L/t	D/L	0.05	0.10	0.20	0.30	0.50	1.00	2.00	
析出硬化型钛合金 (13V-11Cr-3Al)	1.44	0.80	D/t	3.55	2.50	1.76	1.45	1.15	—	—
			L/t	71	71	25	9	2	—	—

注：1) 首先，由给予的尺寸计算L/t值

2) 将这个计算值和表内的界限比 L/t 值比较，前者比后者小的时候，破断限 D//L乘以 L 得出成形可能的 D_{max} 。前者比后者大的时候压曲极限表中用内插法求出对应于L/t的D/t值，这个D/t值乘以板厚 t 得出 D_{max} 。



5 切削性能

(1) 钛及钛合金的切削

钛的比重约4.5为钢的1/2，由于其有优异的机械性能和耐腐蚀性而被重视。是近年出现并已经实用的金属材料。作为飞机结构材料、化学工业用耐蚀材料很有前途。生产成本也逐渐降低。但是假如从加工性，特别是从切削性的观点来看，跟普通金属材料特别是钢材比较，加工性能是不好的。为进一步提高合金强度而添加合金元素后，使硬度、强度提高，与此同时使切削性进一步变坏。一般认为其与不锈钢具有相同的切削性能。

(2) 钛切削加工中的问题

钛合金由于成份不同，强度、硬度等在很宽的范围内变化，不能一概而论。关于钛在切削中的问题考虑以下几个方面。

(i) 由于钛的导热率不好，切削中刀刃前端温度相当高。

(ii) 由于钛有高的强度，切削阻力很大，在切削面上刀具和切屑的接触压力很高，使刀刃前端温度上升。但是，切屑厚度

比较小（因此切屑比大）切屑排出速度变为较大，且刀具和切屑的接触长度也小。

(iii) 由于钛在高温下会和刀具中的氧、氮及其他成份急剧反应，有必要注意刀具前端的温度上升。

(iv) 由于钛的纵弹性系数比较低，对于薄壁零件的装卡和加工的力引起的变形必须加以注意。

(3) 切削条件

使用的刀具，一般用高速钢，在高速切削时也用硬质合金。但是，用硬质合金时最好不使用在成分中含有 Tic 的 P 类合金，而选用不含 Tic 的 K 类合金，刀具形状和切削难切削钢一样，采用较小的前角。

钛的切削速度取 100~200M/分，而钛合金多半为 30~50M/分，当然切削深度不应过大。

切削液是必要的，从冷却的观点乳化油（20倍稀释）、低粘性的硫化油等较好。必要时刀刃前端可吹压缩空气、乳化油冷却剂等。

译自“金属材料”通卷第200号, №10, 1977p163

(黄述哲译、于传谨校)