

美国钛合金

前 言

一九六五年我们编印了“苏联钛合金”，对于钛合金的生产和使用，起了一定的参考作用。现在我们编译的这本资料是这方面工作的继续，定名为“美国钛合金”

这份资料译自美国1972年出版的“钛合金手册”。我们全部译出了它的“第五章机械性能”，为了使读者对每个合金有个较全面的概念，还摘译了第一章中的部份内容，然后分“评述”、“常用牌号”、“合金成份”、“热处理”和“机械性能”这样五个部份并按合金统一编写。

本资料可供设计选材部门参考。编写中有错误和不当之处，请读者批评指正。

目 录

概论	1
1. 工业纯钛	3
2. Ti-5Al-2.5Sn 钛合金	10
3. Ti-8Al-1Mo-1V 钛合金	18
4. Ti-6Al-4V 钛合金	40
5. Ti-6Al-6V-2Sn 钛合金	69
6. Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 钛合金	80
7. Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 钛合金	94
8. Ti-3Al-2.5V 钛合金	104
9. Ti-13V-11Cr-3Al 钛合金	106
10. Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn 钛合金	127
11. Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al 钛合金	138
12. Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr 钛合金	139
13. 其它钛合金	151
13-1. Ti-4Al-3Mo-1V 钛合金	152
13-2. Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo-0.2Si 钛合金	156
13-3. Ti-8Mn 钛合金	158
13-4. Ti-2Cu 钛合金	162
13-5. Ti-7Al-4Mo 钛合金	166
13-6. Ti-1Al-8V-5Fe 钛合金	170
13-7. Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si 钛合金	173
13-8. Ti-2Al-11V-2Sn-11Zr 钛合金	176
13-9. Ti-6Al-2Sn-1.5Zr-1Mo-0.35Bi-0.1Si 钛合金	179
13-10. Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.25Si 钛合金	183

概 论

数据的来源及其处理方法:

下面所列的机械性能和物理性能方面的数据,主要来源于美国的“军标手册”MIL-HDBK-5,同时也来源于波音公司的超音速运输机(SST)计划、空军的计划、NASA以及合金生产厂,如坭坭钢公司、钨金属公司和钛金属公司。

室温最低拉伸性能的数据取自各种通用标准(技术条件),当军用标准或AMS标准不能利用时,就采用合金生产厂提供的最低性能值并在表中或图中注明是暂行的。

比热、热膨胀和热传导数据主要来源于“热物理性能手册”。

数据的类别:

根据MIL-HDBK-5的规则,所列的拉伸屈服强度和抗拉强度数据分两类:一类叫标准(技术条件)类或S类数据,另一类叫统计学类或A和B类数据。这些术语的定义如下:

A类(A Basis)——这表示这样一个机械性能值,即有95%的把握可以期望,至少有99%的性能值高于该值。

B类(B Basis)——这表示这样一个机械性能值,即有95%的把握可以期望,至少有90%的性能值高于该值。

S类(S Basis)——所表示的机械性能值是由军用标准或SAE宇航材料标准给这个材料规定的—个特定的最低值。与该值相联系的统计学保证是未知的,但是它们被认为是代表当前生产中能达到的水平。

对于成熟的合金,A值和S值通常是相同的,对于加工方法尚待改进的较新的合金,在任何时候A值和S值之间都存在一定的差别。对有些合金来说(特别是较新的合金),统计学类性能值和标准类性能值都还未达到,对有一些这类产品(合金/半成品类/供应状态),合金生产厂就提供一些暂行的最低性能值,等积累了更多的资料和数据以后,这些暂行值也许多半是要作修改的。

压缩、剪切和支承性能是导出值,其室温性能值是通过它们与室温拉伸屈服强度和抗拉强度值间的比例关系来确定的。这就要对同一批材料成对地测定上列三种性能和拉伸性能的强度极限值或屈服强度值,并且要以95%的概率算出各对数据间的平均比例值。导出性能的数据类别与相应的拉伸性能值相同,即S类、A类或B类。

应力——应变曲线,蠕变数据,应力——断裂数据和疲劳数据未作统计学处理,而是作为典型数据列出的。

符号

下文中所用符号的定义如下:

A——横截面积,平方英寸;交变应力与平均应力之比;“轴”注;机械性能之A类数据
 C——比热;摄氏温度
 D——直径
 E——拉伸弹性模数;应力低于比例极限时的应力/应变的平均比值
 e——单位变形或单位应变;薄板试样的孔中心线到边缘的最小距离
 E_c ——压缩弹性模数;应力低于比例极限时的应力/应变的平均比值
 E_t ——正切模数
 F——华氏温度
 F_{bru} ——支承强度
 F_{by} ——支承屈服强度
 G——切变模数
 L——纵向晶粒方向
 LT——长横向晶粒方向
 m——“平均”应力的注脚
 N——断裂前的循环次数,疲劳
 n——“正常”的注脚;断裂时用的循环次数;指数;标准的应力—应变曲线的形状系数(即Ramberg-Osgood系数)
 R——应力比,一次循环中的最小应力与最大应力之比
 S——机械性能值的S类数据
 ST——短横向晶粒方向
 T——横向晶粒方向
 t——厚度
 α ——线膨胀系数,平均
 γ ——密度
 δ ——延伸率,%,材料在拉伸试验时的延性指标
 λ ——导热系数
 μ ——泊桑比
 σ_b ——抗拉强度(由标准试样的试验得)
 $\sigma_{0.2}$ ——永久变形为0.2%时的拉伸屈服强度(由标准试样的试验得)
 $\sigma_{-0.2}$ ——永久变形为0.2%时的压缩屈服强度
 σ_{max} ——最大应力
 σ_{min} ——最小应力
 τ_b ——抗剪强度(代表平均剪应力对横截面积的比值)

1. 工业纯钛

(一) 评述

工业纯钛指的是几种含有少量碳、氧和铁等杂质的不同品位的非合金钛。用工业纯钛可以生产各种常见的半成品。它以有优异的成形性著称。易于熔焊或钎焊。

工业纯钛主要用在对强度要求不高的地方，而且它也不能通过热处理来获得高强度。

(二) 常用牌号

三种典型品位的工业纯钛的牌号如下：

$\sigma_{0.2} = 40$ 仟磅/英寸 ²	$\sigma_{0.2} = 55$ 仟磅/英寸 ²	$\sigma_{0.2} = 70$ 仟磅/英寸 ²	生产厂
A—40	A—55	A—70	坭埭钢公司
MMA-1940	MMA-1950	MMA-1970	马丁·马利达铝公司
RMI-40	RMI-55	RMI-70	活性金属公司
Ti-50A	Ti-65A	Ti-75A	钛金属公司

(三) 合金成份

三种典型品位的工业纯钛的杂质含量如下：范围或最高含量，%（重量）

元素	$\sigma_{0.2} = 40$ 仟磅/英寸 ²	$\sigma_{0.2} = 55$ 仟磅/英寸 ²	$\sigma_{0.2} = 70$ 仟磅/英寸 ²
C	0.10~0.20	0.20	0.20
N	0.07	0.07	0.07
Fe	0.30	—	—
O	0.15	—	0.40
H	0.015	0.015	0.0125
Mn	0.20	—	—
其它	0.60	0.60	0.80

(四) 热处理

消除应力退火 一般在1000~1100F保温15~30分钟后空冷。

退火 一般采用1300F，2小时，空冷。

(五) 机械性能

室温性能 从表1-1到表1-3列出了工业纯钛的室温机械性能。物理性能随温度的变化表示在图1-1上。密度为0.163磅/英寸³。拉伸屈服强度为40仟磅/英寸²和70仟磅/英寸²品位的工业纯钛的典型的完整的室温应力—应变曲线示于图1-2和图1-3。

温度对静力性能的影响 拉伸、压缩和剪切强度随温度的变化以其室温强度的百分数的方式表示在图1-4到图1-7上。

表1-1

工业纯钛的机械性能

技 术 条 件	MIL-T-9046						MIL-T-9047
	成份	成份	成份	成份	成份	成份	成份 1
	A	B	C	A	B	C	
半 成 品 种 类	薄 板 和 带 材			厚 板			棒 材 和 锻 件
供 应 状 态	退 火			退 火			热加工和退火
厚 度, 英 寸	<0.1875			0.1875~1.000			<3
数 据 类 别	S	S	S	S	S	S	S
σ_b , 仟磅/英寸 ²	50	80	65	50	80	65	80
$\sigma_{0.2}$, "	40	70	55	40	70	55	70
$\sigma_{0.02}$, "	40	70	55	40	70	55	/
τ_b , "	/	42	/	/	42	/	/
F_{bry} , 仟磅/英寸 ² ($c/D=1.5$)	/	120	/	/	120	/	/
F_{bry} , 仟磅/英寸 ² ($c/D=1.5$)	/	101	/	/	101	/	/
δ , %							
l=2英寸	^a 20	^a 15	^a 18	20	15	18	/
l=4D	/	/	/	/	/	/	15
E , $\times 10^3$ 仟磅/英寸 ²	15.5						
E_c , $\times 10^3$ "	16.0						
G , $\times 10^3$ "	6.5						

a厚度为0.025英寸和更高

表1-2

工业纯钛的机械性能

技术条件	MIL-T-81556			
	成份 A	成份 B	成份 C	成份 D
半成品种类	挤压棒材和挤压型材			
供应状态	退火			
厚度或直径, 英寸	<3.00	<3.00	<3.00	<3.00
数据类别	S	S	S	S
σ_b , 仟磅/英寸 ²	40	50	65	80
$\sigma_{0.2}$, "	30	40	55	70
δ , % (l=4D)	a	a	a	a

a见表1-13

表1-3

工业纯钛挤压棒材和型材的延伸率

厚度, 英寸	延伸率 δ , %			
	成份 A	成份 B	成份 C	成份 D
<1.00	25	20	18	15
1.01~2.00	20	18	16	12
2.01~3.00	18	16	12	10

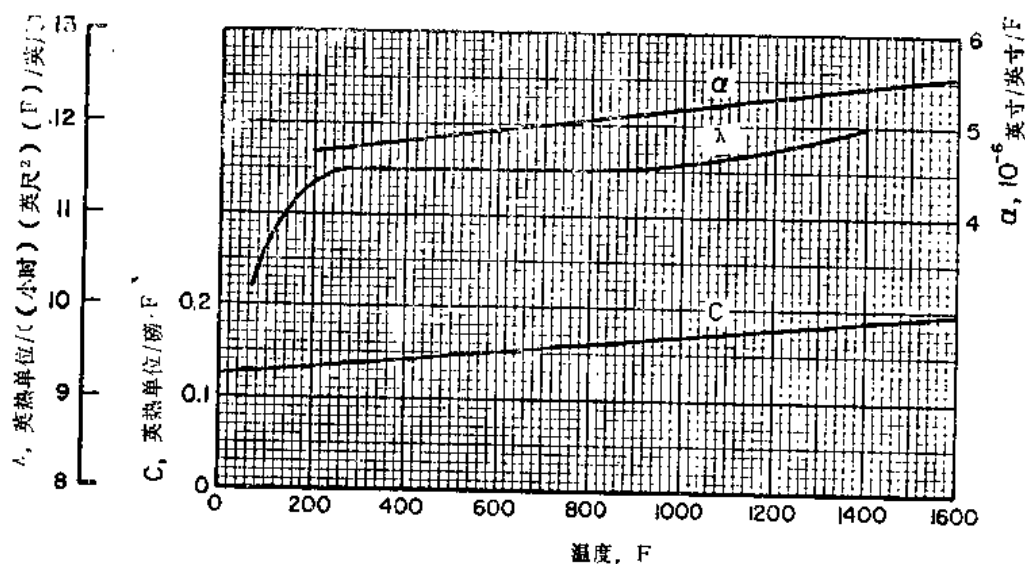


图1-1 温度对工业纯钛物理性能的影响

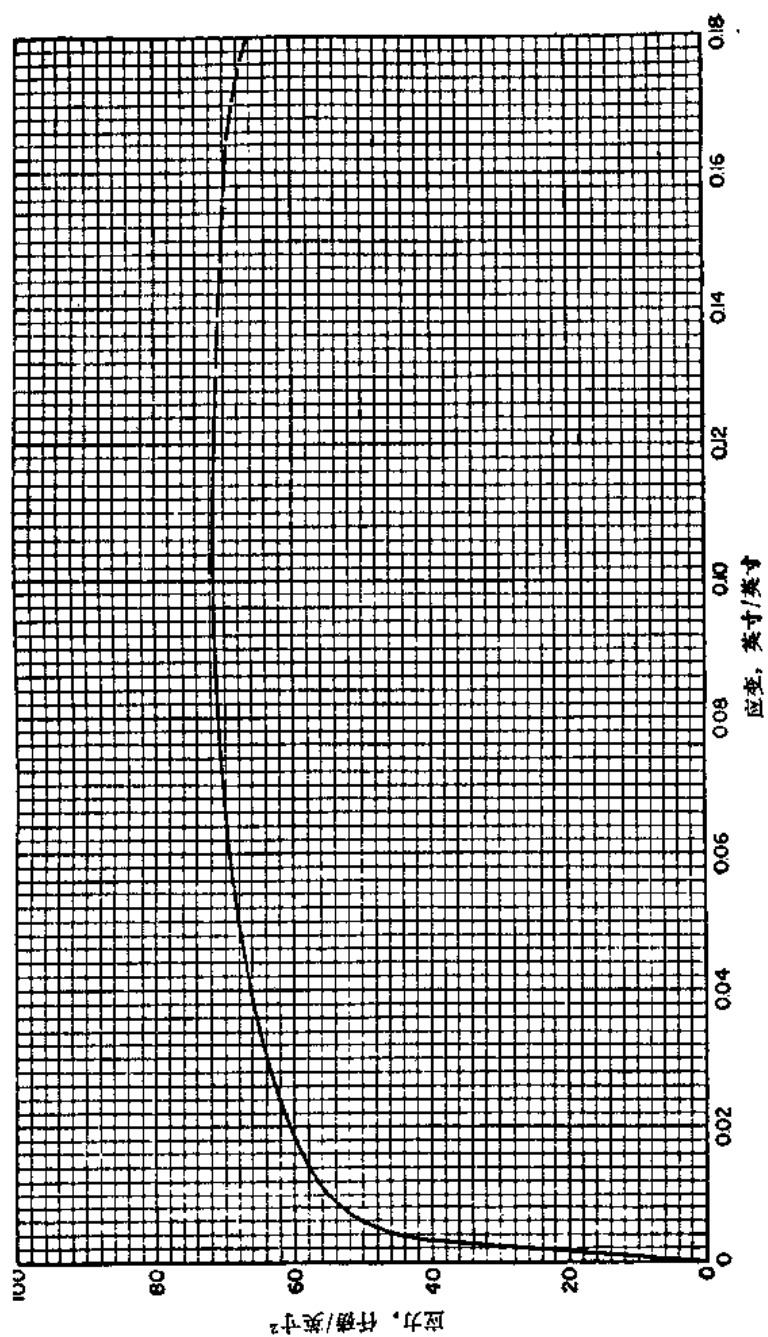


图 1-2 工业纯钛 ($\sigma_{0.2} = 40$ 千磅/英寸²) 薄板典型的完整的室温应力—应变曲线

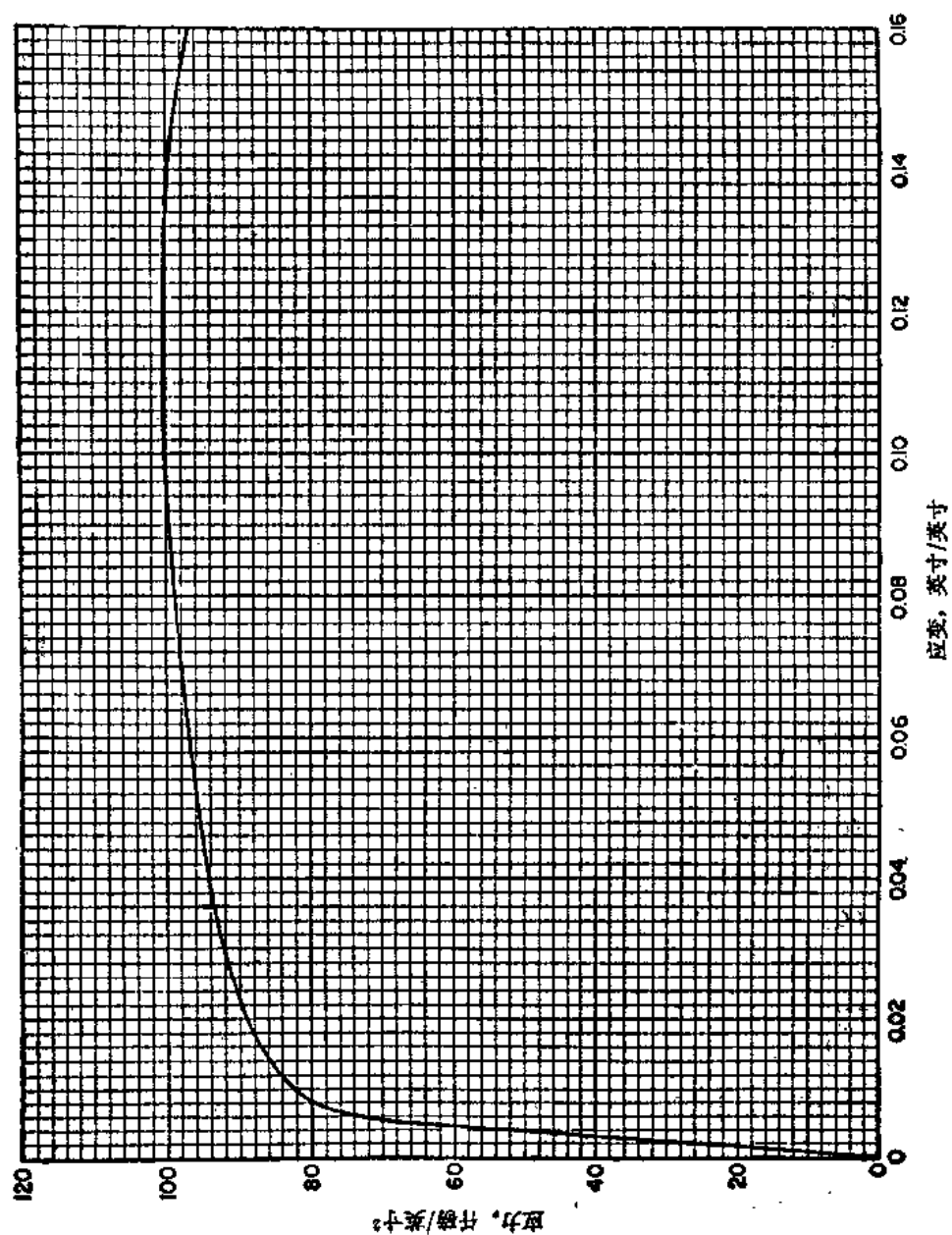


图1-3 工业纯铝 ($\sigma_{0.2}=70$ 千磅/英寸²) 薄板典型的完整的室温应力—应变曲线

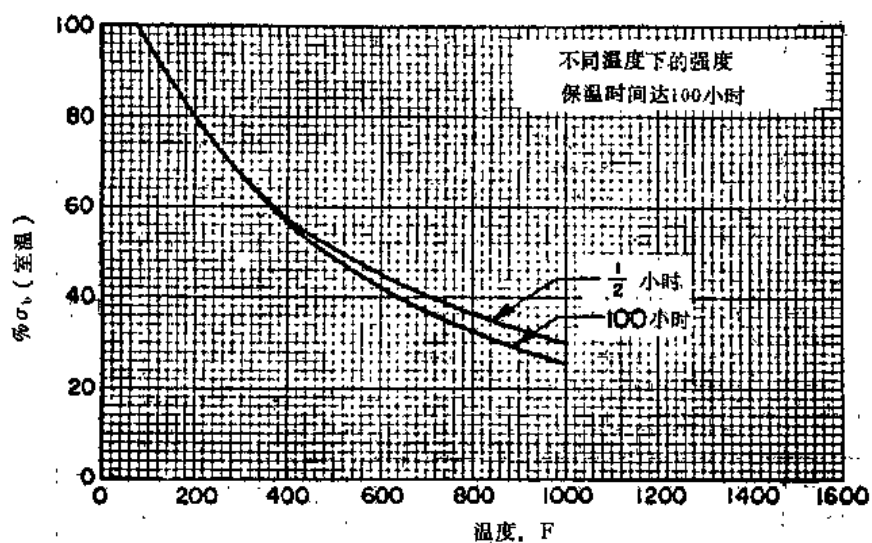


图1-4 温度对退火工业纯钛的抗拉强度 (σ_b) 的影响

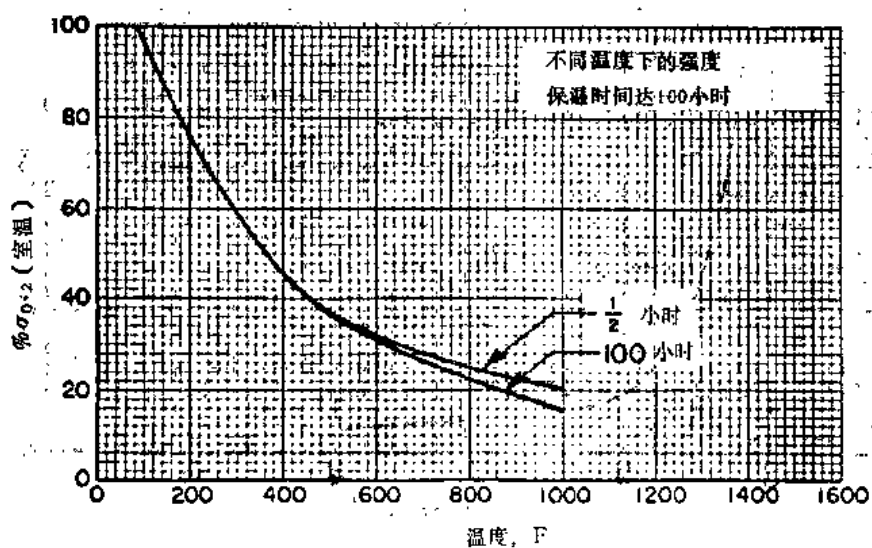


图1-5 温度对退火工业纯钛的拉伸屈服强度 ($\sigma_{0.2}$) 的影响

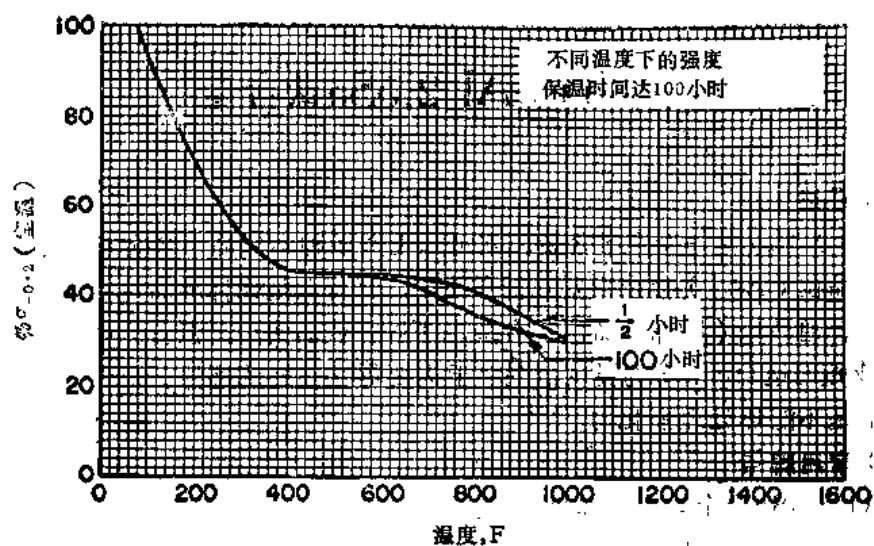


图1-6 温度对退火工业纯钛的压缩屈服强度 ($\sigma_{0.2}$) 的影响

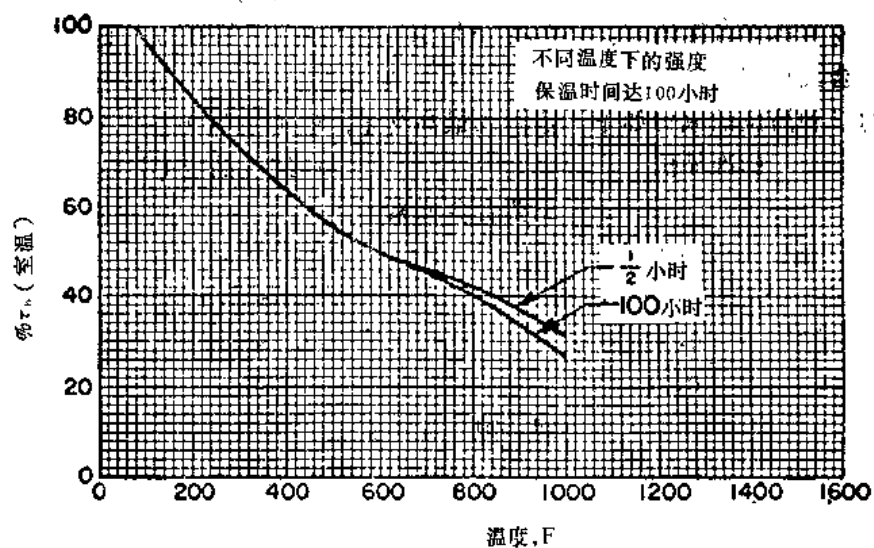


图1-7 温度对退火工业纯钛的抗剪强度 (τ_b) 的影响

2. Ti-5Al-2.5Sn钛合金

(一) 评述

Ti-5Al-2.5Sn 是一个全 α 合金, 它可以生产多种半成品。合金有两个纯度不同的品位, 高纯度品位 (ELI) 合金主要在低温使用, 其特点是比标准品位合金的强度低, 塑性和韧性高。普通品位 (即标准品位) 合金也可以在低温使用, 但首先推荐在从室温到高温 (达900F或短时达1100F) 的温度范围用于需要焊接性好的部件。

此合金是不能热处理强化的。

(二) 常用牌号

Ti-5Al-2.5Sn合金的典型牌号如下:

牌 号	生产厂
A-110AT	堪姆钢公司
MMA-5137	马丁·马利达铝公司
RMI-5Al-2.5Sn	活性金属公司
Ti-5Al-2.5Sn	钛金属公司

这个合金的其它名称还有: 5-2 $\frac{1}{2}$; Al-Sn α ; A-110; IMI-317 (英国)。

(三) 合金成份

合金的二种品位的成份如下: 范围或最高含量, % (重量)

	标准品位	高纯度品位 (ELI)
主要合金元素		
Al	4.0~6.0	4.7~5.6
Sn	2.0~3.0	2.0~3.0
Fe	0.50	0.1~0.2
Mn	0.30	—
间 隙 元 素		
O	0.20	0.12
C	0.15	0.08
N	0.07	0.05
H	0.003~0.020	0.0125 (棒材) 0.0175 (板材)

(四) 热处理

消除应力退火 一般在 1000~1200F保温 15 分钟到 1 小时后空冷。考虑到气体的污染

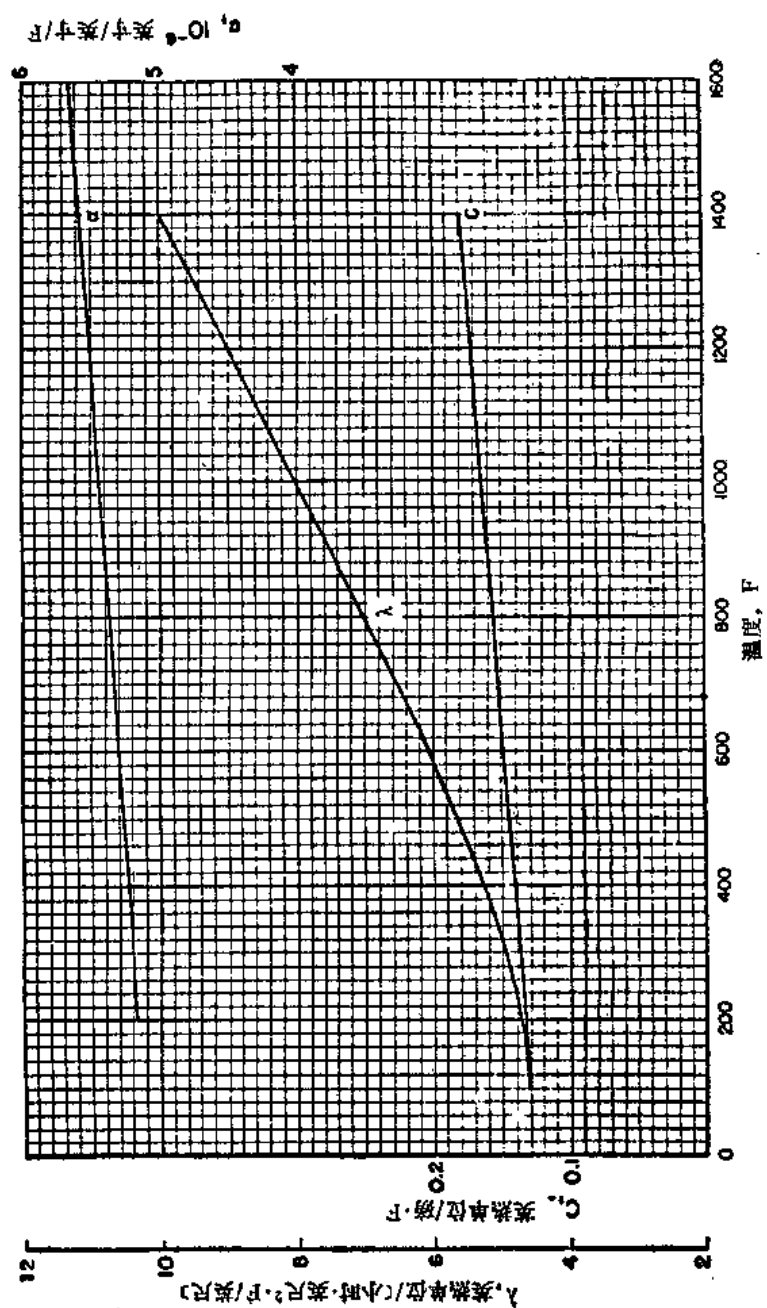


图2-1 温度对Ti-5Al-2.5Sn物理性能的影响

问题, 采用较高的退火温度时可用较短的保温时间。

退火 Ti-5Al-2.5Sn合金的完全退火可以采用下列制度: 在 1300~1600F 保温15分钟到 4 小时。较高的退火温度采用较短的保温时间。退火后一般采用空冷, 真空退火后可炉冷。高于1600F的退火温度很少使用, 因为这将引起晶粒长大和氧化。

(五) 机械性能

室温性能 表2-1综合了Ti-5Al-2.5Sn合金的室温机械性能。合金的密度为0.162仟磅/英寸², 其它物理性能示于图2-1。

温度对静力性能的影响 以其室温强度的百分数表示的拉伸、压缩、剪切和支承强度与温度的关系列于图2-2到图2-7上。图2-8表示温度对弹性模数的影响, 而图2-9则表示温度对延伸率的影响。

蠕变性能 退火Ti-5Al-2.5Sn薄板的典型蠕变性能表示在图2-10上。

疲劳性能 退火薄板的部份的室温恒寿命疲劳图示于图2-11上。

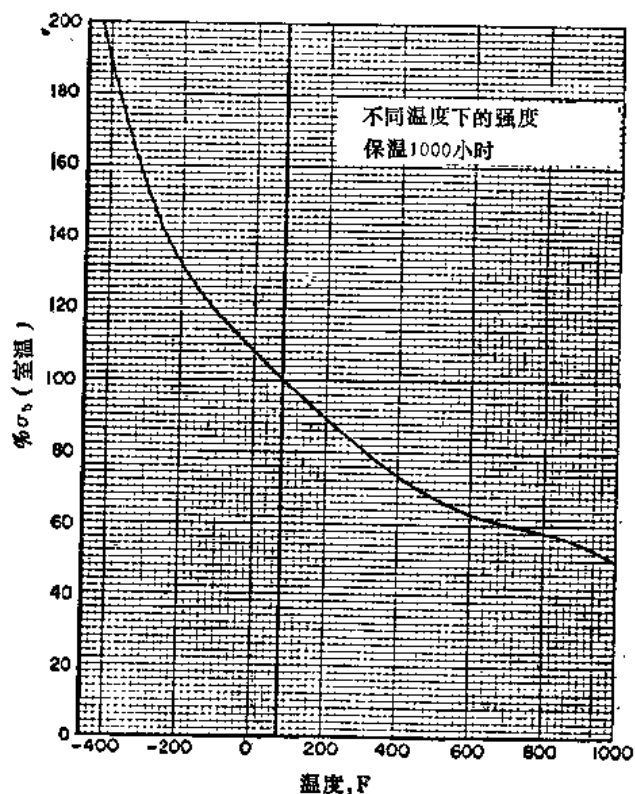


图2-2 温度对Ti-5Al-2.5Sn合金退火薄板的抗拉强度 (σ_b) 的影响: 对于厚板、棒材和锻件则是暂行的。

表2-1

Ti-5Al-2.5Sn 合金的机械性能

技术条件 半成品 供应状态	MIL-T-9046						MIL-T-9047			MIL-T-81556		
	薄板和带材		厚		板		棒材和锻件			挤压棒材和挤压型材		
	退		火		火		热加工和退火			退		
	厚度, 英寸		厚度, 英寸		厚度, 英寸		厚度, 英寸			厚度, 英寸		
数据类别	<0.1875		0.1875~0.2500		0.2501~1.500		≤3			≤1.00		
	A	B	A	B	S	S	S	S	S	S	S	S
	120	125	120	125	120	125	115	115	115	120	115	115
	113	118	113	118	113	118	110	110	110	115	110	110
σ_b , 仟磅/英寸 ²	118	123	118	123	118	123	—	—	—	—	—	—
$\sigma_{0.2}$, "	75	78	75	78	75	78	—	—	—	—	—	—
$\sigma_{0.01}$, "	167	174	167	174	167	174	—	—	—	—	—	—
$F_{0.01}$, 仟磅/英寸 ²	250	261	250	261	250	261	—	—	—	—	—	—
δ , %	133	139	133	139	133	139	—	—	—	—	—	—
$l=2$ 英寸	190	198	190	198	190	198	—	—	—	—	—	—
$l=4D$	10 ^a	—	10 ^a	—	10 ^b	—	—	—	—	—	—	—
E, 10 ³ 仟磅/英寸 ²	—	—	—	—	10	—	10	10	10	10	8	6
E _c , 10 ³ "	15.5						15.5					

^a厚度为0.025英寸和以上^b厚度为0.500英寸以下; 当厚度 $t > 0.500$ 英寸时, δ 值采用 $l=4D$

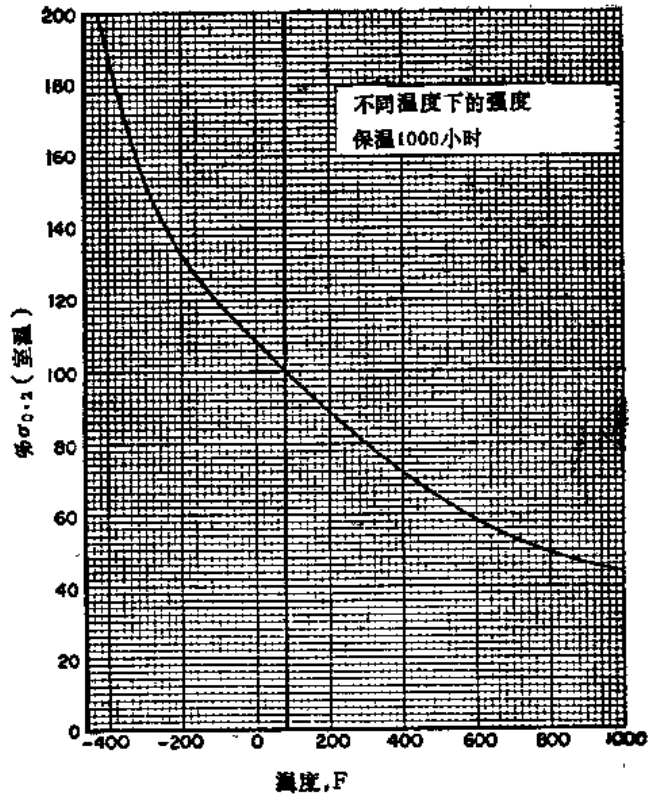


图2-3 温度对Ti-5Al-2.5Sn合金退火薄板的拉伸屈服强度 ($\sigma_{0.2}$) 的影响; 对于厚板、棒材和锻件则是暂行的。

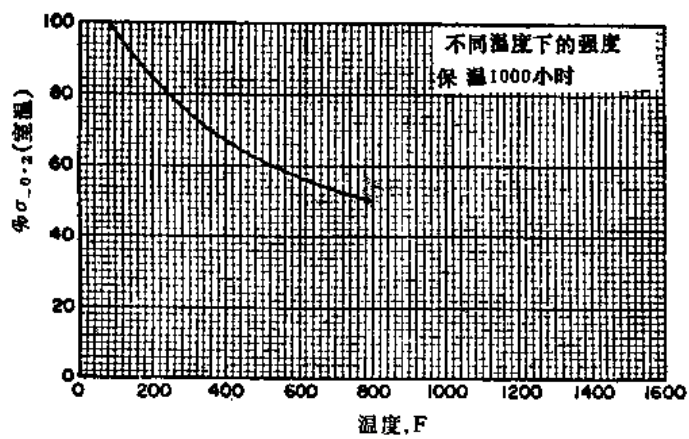


图2-4 温度对Ti-5Al-2.5Sn合金退火薄板的压缩屈服强度 ($\sigma_{-0.2}$) 的影响; 对于厚板、棒材和锻件则是暂行的。