

9610/32
26846

国外冶金

国外钛及钛合金 的现状和发展动向

中国科学院上海冶金研究所编

上海科学技术情报研究所

国外冶金
国外钛及钛合金的现状和发展动向

*

中国科学院上海冶金研究所编
上海科学技术情报研究所出版
新华书店上海发行所发行
上海市印刷三厂印刷

*

1971年7月出版
代号: 1634020 定价: 0.40 元
(只限国内发行)



前 言

根据偉大領袖毛主席“备战、备荒、为人民”和“洋为中用”的教导，我們参考国外有关钛及钛合金的文献資料，編写了这本小冊子，着重介紹美、苏、日、英四个国家钛及钛合金的現狀和发展动向，供我国有关人員参考。

由于我們活学活用毛主席著作不够，編写中难免有錯誤之处，希望同志們批評指正。

中国科学院上海冶金研究所

1971年7月

毛主席语录

洋为中用。

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的經驗，我們需要的是这样一种态度。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

BAI

目 录

1. 美国钛及钛合金的概况·····(1)
2. 苏联钛及钛合金的现状和发展趋势·····(21)
3. 日本钛及钛合金的现状·····(26)
4. 英国钛合金的现状和发展动向·····(35)

毛主席语录

对于每一个人和每一件事，都应该采取分析研究的态度。

按语：钛及钛合金具有很多优点，它的比重轻（仅为钢的57%左右）、强度高（有的钛合金抗拉强度能达140 公斤/毫米² 以上，可列入超高强度钢的行列），有较好的耐热强度、低温韧性和耐腐蚀性。所以它受到世界各国的重视，在不太长（约20 年）的时期内有了相当快的发展。美帝、苏修出于其侵略本性，为了实现其相互勾结、瓜分和霸占世界的野心，扩展其海、空军力量，就对钛及钛合金这一重要战略金属材料不遗余力地进行了研究和发展，其他帝国主义国家也紧紧跟上。因此其发展速度要远远超过其他金属结构材料。目前国外已有各种类型的钛及钛合金产品，广泛应用于航空工业、火箭导弹工业、化学工业及舰艇等方面。本书系将国外钛及钛合金的生产现状、应用情况及其发展趋势作了简扼介绍。目的是根据我国钛工业的情况，批判地从中吸取对我国有用的东西，以起到“洋为中用”的作用。伟大领袖毛主席教导我们：“对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。”事实上，国外报道的资料中有不少是糟粕部分，虽然我们在编写中注意了这一点，但由于我们水平的限制，还会有不少问题，希望大家按照毛主席的教导来对待国外资料。

1. 美国钛及钛合金的概况

（一）引言

1968年5月美、苏、英、日等几个国家曾在英国伦敦召开了一次“国际钛会议”，交流了部分研究、发展结果，其中包括钛及其合金的初级及次级加工成形工艺，一般腐蚀和氧化，应力腐蚀，物理、热力学及动力学，形变，相变及热处理，钛的合金化，钛及钛合金的应用等各个方面^[1]。

本文将就最近国外资料中有关钛及钛合金的现状 & 发展动向，并参照关于伦敦“国际钛会议”的报道^[2]作一些简单介绍，其中较多地介绍美国方面情况。关于苏、日、英等国钛及钛合金的现状 & 趋向还将在本文集中另行介绍。

（二）钛的现状、存在问题和发展趋势

美国自1948年由杜邦公司开始以工业规模生产海绵钛，当时日产量约为45公斤（合年产量约16吨）。以后美帝由于侵略战争的需要，钛工业迅速发展，产量急剧上升，到1956年及1957年年产量已

达到10,000吨以上。1957年后，由于美帝国内经济衰退，海绵钛及钛材产量一度大幅度下降，1958年产量猛降50%以上。1963年后，随着美帝扩大侵略越南战争，钛的产量又逐渐回升，到1967年时海绵钛产量达到每年14,500吨，而消费量则接近20,000吨（不足之数由进口补充）。其1963~1967年间钛的生产和消费情况如表1所示。

表1 美国1963~1967年间钛的生产
和消费情况^[3]

年 份	1963	1964	1965	1966	1967
海绵钛生产量(吨)	7,167	8,200	8,200	14,500	14,500
海绵钛消费量(吨)	8,042	10,098	10,982	17,850	19,100
进口海绵钛所占百分数	16.7	18.3	25.9	26.5	37.5
钛锭的生产量(吨)	10,104	12,700	13,900	21,300	22,700
钛合金型材消费量(吨)	5,740	7,880	8,360	12,640	13,620

也有资料^[4]说美国海绵钛进口量1965年为3,100吨;1966年为5,900吨;1967年为8,100吨,约占美国国内消费量的一半。

美国海绵钛进口的主要来源是日本、英国及苏联。苏修为了和美帝相互勾结,竟将这种重要战略金属——钛——运售给美帝,供其制造杀人武器,仅在1967年即向美出口海绵钛约1,000吨^[5]。此外,苏修还向日本出口海绵钛,再由日本转售于美帝。1967年后,苏修向美帝的出口量还有增加,仅在1969年1~9月,已向美帝出口金属钛达1,300吨左右。

1967年美国海绵钛市场价格如下^[3,4]:其国内生产者2.91美元/公斤。

1968年美帝由于再次经济衰退,钛的产量又一度下降,随着1969年下半年,出于设计超音速运输机的需要,钛的生产及消费量再次回升,其海绵钛的1969年消费量比1968年增加了35%,达到19,500吨左右^[6]。

美帝为了侵略的目的,首先将钛用于航空工业,特别是用以制造飞越大洋的远程喷气运输机以及其他军用飞机。其1965~1967年钛的消费比例如表2所示。

表2 美国钛的消费比例^[3]

年 份	1965	1966	1967
喷气发动机, %	42	54	54
军用飞机骨架, %	30	23	} 40
火箭、导弹, %	15	17	
民用飞机制造, %	} 13	} 6	—
其他民用(主要为化工应用), %			6

1969年由于美帝在超音速喷气发动运输机上大量用钛,使钛用于飞机骨架的百分数大大增加,其消费比例为:飞机骨架54%;喷气发动机34%;化工设备8%;火箭及导弹4%^[6]。

每架大型亚音速喷气发动机的重量中钛要占去约1/3,而在超音速飞机中,由于机身温度增高,更需要用大量的钛以代替过去使用的铝。

英国用钛情况与美国大致相同,1967年,其国内钛销售量的88%用于飞机工业。由于英国经济情况日趋衰落,工业发展速度缓慢,因此在化学工业中及其他方面用钛也不多,所占比例很低。

日本的钛及钛合金主要用来制造化工设备,并

向美国出口。

苏联于50年代初期开始生产海绵钛,但它从来也不公开发表其生产及消费数字。据估计目前年产量约为10,000吨,绝大多数用于军事目的。

现在美国生产钛的三家最大公司为:美国钛金属公司,活性金属公司,以及俄勒冈冶金公司;英国则由帝国金属公司独家垄断;苏、日情况参见本书第2第3部分。

目前降低钛生产成本的一个巨大障碍是“废料循环”(指废料回收重新使用),这一关还没有突破。根据统计,在生产海绵钛时大约要产生10%的废料,在生产钛的半成品和成品时,总损耗量约占金属投料的80%^[7],其中包括切削损耗及废品等。有人预言,如果这个问题得以解决,则钛金属铸锭的成本最少会降低三分之一。这应当作为未来几年中的一个重要课题。

在熔炼钛锭时,可加入部分钛的废料碎屑于电极中熔炼来利用废钛,但此方法难以保证钛锭的质量。对于大块的废料(多半来自大型锻件的废品),则处理起来更为困难,若将大块废钛加入钛电极中熔炼,则所得钛锭成分很不均匀。美国过去曾试验用感应电炉“凝壳熔炼”钛的废料,但目前仍多半将这种废料用作炼钢添加剂,代替钛铁,其经济价值会大大降低。苏联为了解决这个问题,特别设计了一种间歇的自耗电弧炉,在炉子四周建造一圈圆环状的可转动的料仓,熔炼时按时将电弧停歇,将电极退回,由料仓中通过一个进料口加入尺寸为5~7.5厘米的废钛4~5公斤,每一个循环熔炼金属20公斤,在总的铸锭中可加入废钛40~50%^[6,7]。

苏联还用粉末法回收废钛,将废钛碎屑或块料在高温下氢化,制成氢化钛细粉,供粉末冶金方面使用。它在钛的粉末冶金方面所做的工作超过美、英等国。

(三)合金系统的发展和趋向

美、苏等国的钛合金系统在50年代已经基本定型,60年代的进展不大。目前钛合金系统中基本包括下列三种类型:

(1) α 型——包括全 α 型(如工业纯钛, Ti-5Al, Ti-5Al-2.5Sn),近 α 型(或称准 α 型,如 Ti-8Al-1Mo-1V),及 α +中间化合物型(如 Ti-2.5Cu, Ti-5Al-2.5Sn-3Cu)。

(2) $(\alpha+\beta)$ 型——合金种类最多,如 Ti-6Al-4V, Ti-4Al-3Mo-1V, Ti-8Mn等。

(3) β 型——如 Ti-3Al-13V-11Cr, Ti-4.5Sn-6Zr-11.5Mo, Ti-3Al-8Mo-11Cr等。

在所有钛合金中除极少数例外，都加入一定量的铝作为 α 稳定化元素。英帝国主义由于控制着马来亚锡的生产，因此在其合金系统中广泛加锡。用铝作为 α 强化元素在60年代有较大发展，苏修由于缺锡，因此在某些合金中用铝代锡，以适应其本国资源情况，如其BT9合金中就用2%的铝代替原来的2.5%的锡，成为Ti-6.5Al-3.5Mo-0.2Si-2Zr的额定成分。

各国都广泛使用铝作为强 β 稳定化元素，在弱 β 稳定化元素方面美国多用钼，而苏联则较多用铌。英国则少用钼，但近年来发展了一系列含少量硅的合金，硅和铜都是快共析型的 β 稳定化元素，在合金中生成化合物，可以提高合金的高温强度。日本则发展了含钴的钛合金Ti-8Al-4Co以及一系列低铁的纯钛及其合金，以适应其在化工设备方面的应用。

某些合金曾一度被认为性能非常优越的材料，例如Ti-8Al-1Mo-1V，由于其中含铝较高，比重很低，抗蠕变强度良好，曾被美帝选为超音速运输机(SST)的主要蒙皮及骨架材料，后来发现它的抗热盐及海水应力腐蚀性能很差，不得不由其他合金如Ti-6Al-4V等取代。因此，在过去廿年中，虽然发展了很多合金，但经全面的生产规模试验估价后，只有少数能成为正式工业合金而被广泛使用^[9]。有许多合金一直停留在实验阶段，有的则被淘汰。

美国的有关厂希望钛合金的长期使用温度参数能够突破538°C(1000°F)，这样就可以在超音速飞机上大量应用。

有人认为当前钛合金应当在下列三个方面发展^[9]：

(1)在 α 及 $(\alpha+\beta)$ 型合金中发展一种针状 α 结构(转变的 β 组织)以改善合金的抗蠕变、断裂及应力腐蚀性能。

(2)在 α 型合金中加少量硅以提高其蠕变强度(美国到目前为止，不愿在其钛合金中加入这类能生成化合物的合金元素，主要是为了保证合金的均匀性及稳定性)。

(3)发展亚稳定的 β 合金以获得高强度以及高的冷加工成形性。例如新近发展的 β -III合金(Ti-4.5Sn-6Zr-11.5Mo)，据称具有非常好的冷成形性，并具有强度高、可焊性良好等特点，适合于制造螺栓、铆钉以及冷轧板材、带材等^[10]。此外，如Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al也是各方面性能较好的 β 型合金，在高温使用时结构非常稳定。

利用粉末冶金法生产钛合金值得重新重视起

来，在这方面有可能开辟出一条新的发展途径。

美、英以及苏联工业钛合金的成分、牌号、性能及用途等见附表1、2。

(四)钛及钛合金的制造工艺

(1) 熔 炼

到目前为止，熔炼钛及钛合金一般都是采用真空电弧炉两次自耗电极熔炼。苏联目前最大钛锭约为五吨，而美国则已达八吨，以适应其巨型飞机俄件的需要。

英国钛厂采用了西德制造的用液态金属冷却铜坩埚的真空电弧炉，以取代通常的水冷系统。所用冷却剂为共晶成分的钠-钾合金，其中含钾78%，熔点为-11°C，它与钛不起作用。用这种冷却剂可以避免铜坩埚漏水时所引起的爆炸。他们用这种炉子熔炼出直径为660毫米(26吋)重量为2268公斤(5000磅)的钛锭^[11]。

美国某兵工部门曾试用石墨坩埚(底部加上钛的“凝壳”)在感应电炉中熔炼钛合金(Ti-6Al-4V)的废料。废料中含碳为0.03%，所得钛锭中含碳为0.13—0.22%，最好时含碳量低达0.06%，塑性尚好^[12]。另一部门也在感应电炉中熔钛，但利用氟化钙(CaF₂)等造渣覆盖，除去覆盖熔池表面外，还能在坩埚与金属锭间生成一层固体的渣，可以避免熔融金属直接和坩埚起反应^[13]。

在1968年的伦敦“国际钛会议”上也有关于电弧熔炼的工作报告。

国外正在试用电子轰击炉熔炼钛，所熔出的钛锭的机械性能及气体含量均优于用真空电弧炉所熔得者，并且可能处理废钛，值得进一步试验研究。

(2) 轧 制

过去，钛都是在轧钢设备中轧成板材，但为了适应钛的特殊要求，应当建造专用的设备。

美国在轧制高质量薄板方面是采用连续化生产的，他们将热轧所得重达五吨的钛带用冷轧带材轧机连续轧制，并且同时连续真空退火。其真空退火炉高度约相当于三层楼房，在进口处安装橡皮滚筒以保持炉内真空。苏联在这方面比较落后，生产尚未连续化。

美国用特殊轧机将0.125~0.25毫米厚的钛薄板轧成厚度为0.0025毫米的钛箔，其压下量系根据钛的纯度而定，对于工业纯钛可在620~730°C(1,150~1,350°F)间去应力退火后轧制，每次退火后的压下量为50%，然后在真空中退火^[14]。

利用轧制以获得具有一定织构的薄板对于低温钛合金有很大意义^[15~17]。由于钛及其合金的滑移

系统通常为 $\{1011\} \langle 1120 \rangle$ 、 $\{10\bar{1}0\} \langle 1120 \rangle$ 以及 $(0001) \langle 1120 \rangle$ 。在所有系统中滑移方向均为 $\langle 1120 \rangle$ ，这个晶向与 (0001) 面平行，因此当钛板具有 (0001) 织构即材料中各个晶粒的 (0001) 面与钛板表面平行，在受到双轴向应力时将不会产生滑移，因而具有很高的屈服强度。试验结果证明由某些 α 型合金所制的高压容器，如果具有这种织构，在超低温（液氮及液氢温度）时其双轴向屈服强度为单轴向屈服强度的1.53倍。即使容器上带有焊缝也并不影响这种强度的增加。

有些合金如Ti-6Al-4V的薄板经过固溶处理及时效，强度可以提高17%以上，但常规的淬火操作通常导致严重的尺寸畸变。美国采用“蠕变平整”方法以改善这类淬火薄板的平整度，然而在538°C(1000°F)的时效温度下，Ti-6Al-4V合金具有良好的蠕变强度，因而这种方法并不能使它的薄板获得满意的平整。由于这种原因，使得固溶处理及时效的薄板价格昂贵，通常很少应用。

实验工作指出，薄板能在高温时经过喷洒水淬火而不变形，其必要条件是薄板固定在栅架上，并且要使板的两面所有区域同时淬火，使淬火应力均匀分布。另外一种有发展希望的工艺是将薄板浸入熔盐中淬火，以降低淬火和未淬火区间的温度梯度。在这方面最理想的解决办法是发展一种合金，使其薄板能在空气中硬化而获得所要求的强度及韧性。

国外还试验将钛合金材料在高于其 β 转变线以上温度轧制，以改善其断裂韧性以及对某些“环境破裂”（例如“应力腐蚀破裂”）的抵抗能力。关于这方面问题可以参阅下节有关 β 锻造的介绍。

(3) 锻造

目前大部分钛的锻件都是用于飞机部件，其中包括压气机盘和隔片、压气机叶片、各种法兰盘、以及飞机骨架结构等。

一般说来，钛合金比沉淀硬化不锈钢难锻，但比抗蠕变的镍基高温合金好锻。使钛合金变形所要求的压力受到应变速率的影响，而且对于温度也有很大的依赖关系（参见图1）。目前主要困难在于绝大多数合金只能在很狭小的温度范围内锻造才能获得满意的结果。

$(\alpha+\beta)$ 型合金的性能受到其显微结构的影响很大，因而许多锻件的使用部门都规定了能在一定强度下有最好延伸塑性的组织结构。根据这样的条件，所有的锻件都必须在 β 转变线温度下完成，才能达到要求。

因此在选择某种 $(\alpha+\beta)$ 型合金的锻造温度时，

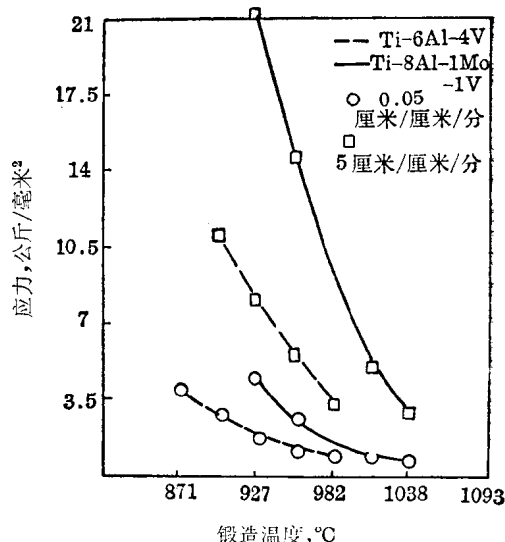


图1 在两种应变速率下Ti-6Al-4V及Ti-8Al-1Mo-1V锻件的屈服强度^[18]

首先需要了解其 β 转变线温度。在锻造过程中，材料内部温度必须留有升高的余地。由于材料中内耗能量的增加，而钛的导热性低又阻止它很快地将热量散布到整个工作截面中，因而温度的增高往往局限于工件的某些区域，造成了显微结构的不均匀性。

α 型合金通常在 $(\alpha+\beta)$ 区域上部锻造而不是在全 β 相区锻造，以防止晶粒的过分长大。这样通常能获得均匀的拉伸性能。

由于锻模的冷却作用，慢动作的压机可能造成工件表面开裂，但若在锻模与锻件间加入绝热材料，则可以减少这种影响。

目前苏联最大的锻压和挤压设备分别为75,000吨的垂直压机和20,000吨的水平挤压机；美国的相应设备容量分别为50,000吨及15,500吨。

美国现有的两台50,000吨水压机对于正在设计发展中的巨型飞机所要求的某些整体钛合金锻件是无能为力的。他们采用了某些技术来补救，主要用下列两种办法：①将锻模缝隙填满以获得较大的单位压力；②采用预成型，然后再压制最后的肋状或蹼状结构锻件。

美国大型锻件的一个例子是重达352公斤(775磅)的直升机转子轮毂。用这样的Ti-6Al-4V锻压部件可以替换原来602公斤(1325磅)重的钢锻件。设计中的波音超音速运输机摆动翼所需的枢轴凸耳重量将达5,000公斤(11,000磅)。对于这样大小的锻件有一个操作经济的问题。如果不能锻造出一个和最终尺寸相当接近的部件，就意味着要多

消耗大量金属, 并且需要很长的切削时间, 才能使锻件成为最终部件。

与大型锻件有关的问题是合金发展和熔炼操作有一定的矛盾。一方面由于要求更大的锻件, 就需要更大截面的锻坯, 它转而又要求更大的铸锭。在另一方面, 合金成分变得愈来愈复杂, 而且是高合金化的, 它们在大截面中常常会发生合金元素偏析的问题。偏析降低了材料横向的性能。由于在大锻件的设计应力中时常包括横向的负荷, 因此在这个方向上的性能变得比过去更加重要, 这样就发生了矛盾。对于这一类问题就必须根据实际情况, 找出矛盾的主要方面, 进行解决。

采用 β 锻造代替过去“正规”的 $(\alpha+\beta)$ 锻造, 已经逐渐引起了人们的注意。在 β 转变线以上的温度加热锻造, 对材料的利用可能有所改善。美国某航空公司曾对此方法进行过一些探索, 他们发现尽管在锻件中出现有高度畸变的、经过转变的 β 晶粒, 但仍能得到良好的塑性。他们认为这种锻造工艺改善了所有美国钛合金的可锻性, 而对合金的性能总的说来并无不良影响, 对其缺口敏感性、蠕变强度、以及断裂韧性等均有所改善^[18,19] (参见表3及附表3)。

不论是 β 锻造或者 β 热处理对于含硅的英国合金, 如 IMI—679 (2.25Al—11Sn—5Zr—1Mo—0.25Si), IMI—684 (6Al—5Zr—1W—0.25Si), 海奈特 (Hylite)—60 (3Al—6Sn—5Zr—2Mo—0.5Si) 和海奈特—65 (3Al—6Sn—5Zr—0.5Mo—0.5Si) 的拉伸性能都没有重大损害。除去 IMI—684 外, 英国合金的锻造温度限制在 β 转变线以上大约 55°C (100°F) 处, 以避免严重的硅化物偏析。

美国的合金则已在生产规模上在高于 β 转变线温度 160°C (300°F) 处锻造 (见附表4)。采用 β 锻造或 β 热处理对于所有合金的断裂韧性都有明显的改进 (见附表3); 而在英国的合金中只有 IMI—684 表示出显著的改进。

英国有人认为 β 锻造的适应性取决于合金成分、每次加热后的压下量以及此合金通过热处理所达到的强度水平等因素。对那些大量含钼的强 β 稳定化元素的合金进行 β 锻造, 通常会导致塑性的显著下降。如果这个合金在正常的 $(\alpha+\beta)$ 操作条件下接着进行热处理以获得其最高强度, 则上述论点表现得尤其明显。对高强度合金 IMI—680 (Ti—11Sn—2.25Al—4Mo—0.2Si) 和 IMI—700 (Ti—6Al—5Zr—4Mo—1Cu—0.2Si) β 锻造的结果就是上述情况的例证。

据称, 如果热处理工艺是常用的 $(\alpha+\beta)$ 固溶化

加上时效, 在初始粗锻阶段用 β 锻造, 接着在最后的模锻时用 $(\alpha+\beta)$ 锻造, 则能获致优良的性能。

表 3 β 锻造与 $(\alpha+\beta)$ 锻造部件的性能比较^[18]

机械性能	Ti-6Al-4V	Ti-8Al-1Mo-V	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo
屈服强度(21°C)	略低	略低	略低
抗拉强度(21°C)	相同	相同	相同
延伸率	相同	相同	相同
断面收缩率	降低	降低	降低
缺口抗拉强度 ($K_t=10$)	升高	升高	升高
缺口抗拉疲劳强度 ($K_t=3.8$)	升高	升高	升高
疲劳强度	—	—	—
蠕变强度	升高	升高	升高
蠕变稳定性	相同	相同	相同
断裂韧性	升高	升高	升高

含有温和的 β 稳定元素的合金, 例如 Ti—6Al—4V, 若在每次加热操作后压下量很大时是可以进行 β 锻造的。对于含有少量 β 稳定元素的合金如 IMI—684, 则可以全部在 β 相区锻造, 其机械性能不会下降。这类合金可以在高达 1,099°C (2,010°F), 即高出 β 相变线 80°C (145°F) 的温度下锻造。锻造结果, 虽然合金的塑性比正常时稍低, 但仍能合乎材料所要求的规格。

英国有关人员大力推广棒材的 β 操作, 他们将事前在 β 相区轧制的 IMI—679 料坯, 再在 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造得出的盘, 与全部在 $(\alpha+\beta)$ 相区操作的坯料所锻成的盘相比, 在压缩比为 5:1 时, 两者具有几乎完全相同的抗拉强度及塑性。矩形截面的 IMI—684 合金棒材经过 β 轧制, 继以炉冷和时效, 与同样强度水平的同一合金、但在 $(\alpha+\beta)$ 相区操作后的性能相比, 前者具有较好的延伸塑性及较高的断裂韧性。

美国某研究所还与航空公司合作研究出“等温锻造”技术, 将精密模锻的模具加热到 870~980°C, 可以使用较小的压力进行锻造^[6]。

(4) 鑄造

锻造一直是在供应飞机中某些钛合金部件的主要加工手段, 但是这种情况预期不会再继续维持下去, 而将由铸造取代其部分部件。目前, 飞机发动机和骨架的结构组件中, 已经应用了一些精密的钛合金铸件, 例如轴承的毂、支杆、壳体、托架、以及压气机罩等。由于铸造能制成形状复杂以及抗蚀性

良好的铸件，它对于制造化工设备有很大价值。
目前钛的铸造过程系根据“凝壳熔炼”的原理，

即将电弧炉和铸模等一同放在真空室内，如图2所示。

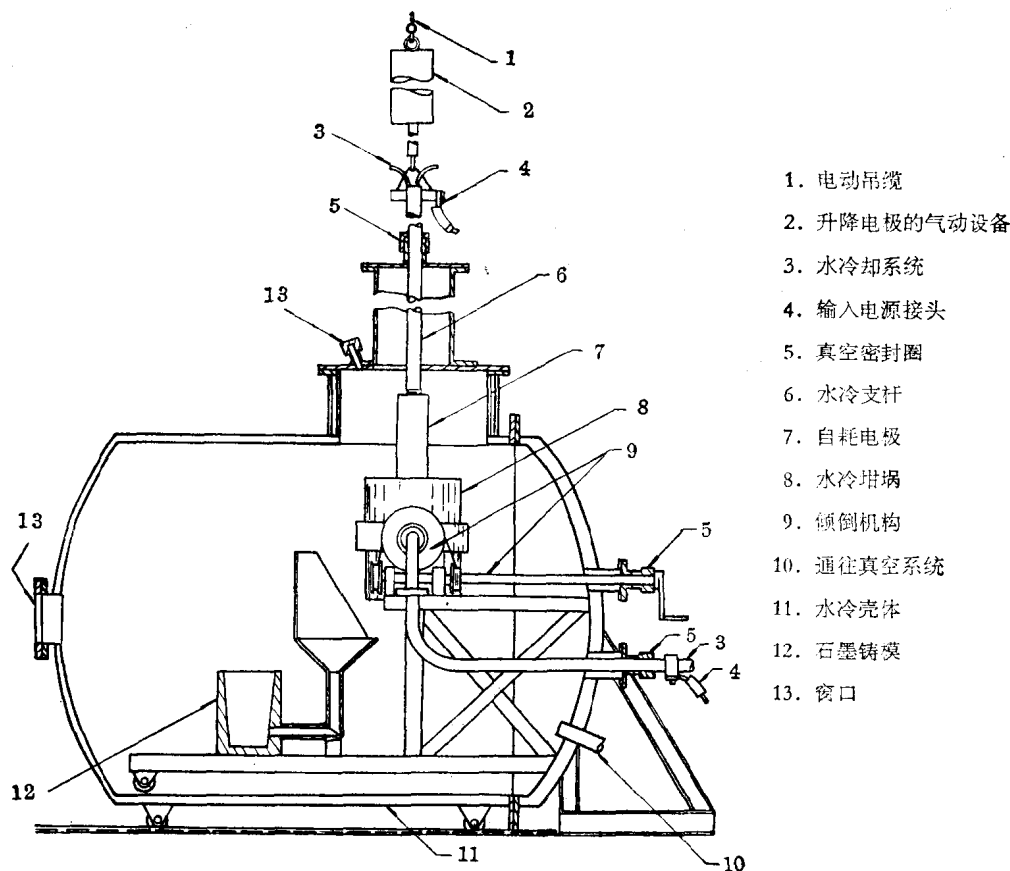


图2 凝壳铸造炉的示意图^[20]

当前铸钛工作中主要的课题是研究、发展对于高度活泼的熔融钛不起化学反应的铸模材料，以防止铸件表面的污染及内部气孔的生成。由于熔融钛进入铸模后很快就冷凝，因此铸模材料问题不象坩埚材料问题那样严重。过去使用过的铸模材料有铸铁、铜（整块的或水冷却的）、石墨（整块的或粉末压制烧结的）等，它们现在还在一定范围内使用。

当金属在铸模中凝固时，将放出一定的热量（等于其熔融热），被模子所吸收，因此铸模材料的热容和铸件质量有很大关系。当铸模具有高的热容时（例如某些金属模），热量将由铸件传给模体，因此铸件和模子间的界面温度较低，所发生的化学反应不很强烈，对铸件污染较小，但在铸件表面上容易生成折绌、流线和波纹等。反之，如铸模材料的热容小时，则界面温度较高，在铸件表面不会出现折绌、流线、波纹等，但化学反应则比较强烈。控制热容的因素为铸模材料的成分、疏松度以及厚度等。

另外，一种改善铸件表面光洁度的办法是使金

属过热，但这在“凝壳熔炼”时是不易做到的。

铸件表面发生缺陷时，须要用熔焊方法修补。

美国现在已经研究过几种精密铸造的方法，其中最有希望的一种是用失蜡法(Lost-wax method)制造铸模，首先按所需铸件的形状制成蜡型，再将此蜡型浸于石墨浆汁中，当它还是湿的时候，塞进灰泥颗粒堆中。然后让此覆被层干燥。将这种浸石墨、涂灰泥、及干燥步骤反复进行，直到环绕蜡型的外壳达到所要求的厚度为止。然后将它加热使蜡熔化并流尽，再将模子用火焙烧。根据模子的尺寸及形态，决定壳体中的层数以及每层中灰泥的颗粒度。此外，可以将做好的模子渗进一次或多次的树脂粘合剂或者稠化剂，并重新火烧。用“失蜡法”制造铸模，其中的“泥芯”问题较难解决。

另一种方法是用NaCl等盐类粘结石墨粉制造铸模，由于这种铸模可以用水溶解，因而可以解决“泥芯”问题。

苏联的铸钛方法和美国相仿。他们也使用双区

间的自耗电熔铸炉。根据铸件类型的要求,采用了失蜡法、压制石墨粉以及永久的“冷铸”钢模。

苏联广泛使用了两种改进的离心铸造法,一种是将坩埚和放置铸模的浇铸台同时转动,液态金属由于离心力的作用在坩埚中升起,并且强迫通过坩埚壁上的孔嘴喷出。另一种方法是将坩埚和浇铸台(用于大型铸件时)各自独立旋转,使得铸模在浇铸前能够达到最佳的转速。

苏联多数的钛铸件使用了二元的Ti-5Al合金,它具有良好的可铸性、可焊性和机械性能。

目前苏联的钛合金铸件还没有用于飞机上的关键部位,例如喷气发动机中的压缩机转子等,而是用作一些静止的部件,如压缩机罩及小型转动部件(如起动机)等。

目前在铸造时所用合金还都是变形钛合金的成分,没有专为铸造而发展的钛合金系统。

(5) 接 合

通常采用三种途径进行钛及钛合金的接合^[21,22]。

①焊接 钛和钛合金可以进行焊接接合。用电子束焊接可以获得极高质量的焊缝,这种焊接系在真空中进行。通常用来焊接机翼配件、发动机短舱等。此外可以在惰性气体保护下用等离子钨电弧焊接,这种方法的适应性较广。

②粘接接合 此法用于接合亚音速及超音速飞机中的蜂窝夹层结构等。在低温使用情况下,采用环氧树脂作为粘结剂,可以给出满意的结果。但对于超音速飞机上的应用,则需要采用聚酰亚胺作为粘结剂。不论用那一种方法,都必须将欲接合的钛表面事先经过必要的处理。

③扩散接合 钛具有能在其金属中溶解其氧化物的特性(除钛外还有锆是这样),因此特别适合于采用扩散接合,在操作时金属钛原子很容易通过扩散穿越界面。操作温度应略低于其 β 转变线温度,这时钛的屈服强度较低,易于形变。扩散接合可以采取轧制接合以及静压接合,前者适用于单向的夹层结构等,后者可以制造模拟的锻件以及接合复杂的组件,操作时均在真空中进行,在界面上的压力为1.4公斤/毫米²,于940°C时经过8~16小时完成。曾用这种方法接合成功GE-4型喷气发动机的空心压缩机叶片。

其他新的接合技术还有爆炸接合、扩散铜焊、以及对双金属紧固件的摩擦焊接等。

(五) 钛及钛合金的应用

(1) 在航空及空间方面的应用

当前美国的喷气发动机中主要使用了五种钛合

金,它们是: CP Ti-70(工业纯钛), Ti-5Al-2.5Sn, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-6V-2Sn, 以及 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo。用 Ti-6Al-4V 所制的薄板和锻件比其他钛材用得多多,约占全部钛合金用量中的60%。如果使用温度不高,但特别需要高强度时,则选用 Ti-6Al-6V-2Sn。在较高温度(260~482°C即 500~900°F)下使用时常用 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, 这个合金有较好的耐热强度。如在应用时对强度、刚度要求不高,但需要良好的薄板成形性时,则选用 CP Ti-70, 它的加工成形性极好。如在这类材料中要求较高的强度时,则可以选用 Ti-5Al-2.5Sn。

英国也有对应的合金,它们的性能也和以上合金相仿。他们在选用喷气发动机中薄板材料时使用 Ti-2.5Cu, 据称,这种合金材料比 Ti-5Al-2.5Sn 有较好的室温成形性,而且在熔焊时,不易受空气污染。

美帝为了侵略目的,正在积极设计制造能跨越大洋的巨型军用喷气运输机。这种飞机的航速有的达到马赫数3附近,其机翼前缘及某些其他部位的温度将达到315°C(600°F)以上^[23],因此需要大量使用钛合金以代替过去使用的铝合金。其设计中的S.S.T运输机的结构材料中有90%是钛,每架飞机所消耗钛量(加工前)估计为220吨(480,000磅)^[6]。他们对于这种超音速运输机材料的选择,考虑到下列因素:①各种温度下的强度与重量比(即比强度),②对于腐蚀尤其是应力腐蚀的抵抗能力,③冶金稳定性,④对于疲劳损害的抵抗能力,⑤现成型材的利用率,⑥加工成形性。在准备用以制造这类飞机的合金材料中, Ti-6Al-4V 被选来制造飞机骨架中的主件。亚稳定的 β 合金(如 β III即 Ti-4.5Sn-6Zr-11.5Mo)可以用作紧固件、薄板及带材、管材等。其他可能采用的合金有 Ti-3Al-2.5V, Ti-4Al-3Mo-1V, Ti-15Mo-5Zr, Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-6Al-2Zr-2Sn-1Mo-1.5W-0.1Si 及 Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.25Si 等^[24]。在一个组件中,不同部位选用不同材料,是一个重要的技术问题。

在英、法共同设计制造的“协作式”超音速运输机中也大量地使用了钛,用钛的结果可以使每个发动机减轻454公斤(1,000磅)。这种发动机的操作温度如下:在马赫数为2.0时,巡航中吸进空气的温度为130°C(265°F),空气进入发动机后,温度逐渐升高,当越过高压压气机一半路程时,温度已上升到450°C(840°F),按照这种温度情况,选用

Ti-6Al-4V 制造全部低压压气机叶片。直立第一级高压盘的全部压气机盘系用一种 Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si 合金（海奈特-50）制成。这种合金也用来制造第二级和第三级的高压压气机叶片。其余的高压压气机级（共三个盘）是由 IMI684 (Ti-

6Al-5Zr-1W-0.3Si) 钛合金制造的。在这种发动机中还大量使用了 Ti-2.5Cu 合金。

用于高速飞机中几种现有钛合金的蠕变强度如图 3 所示。

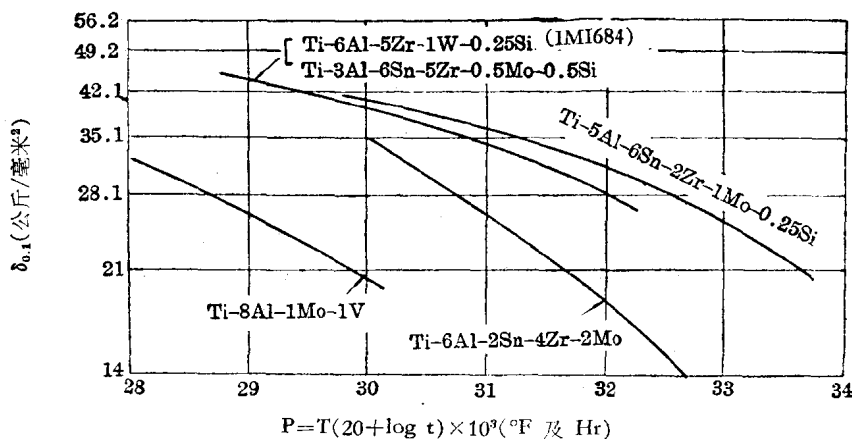


图 3 几种钛合金的蠕变强度^[2]

在合金发展方面希望能有强度更高的钛合金以便进一步减轻超音速运输机骨架结构的重量。对于很多种应用途径来讲，更高的强度必须伴随以更大的断裂韧性，才能使这种材料有可能使用于更高的应力水平。美国飞机的设计人员认为在某些应用中，如果能够改善材料的断裂韧性，则虽然降低一些强度也是可以的。假使强度的增加是由于在合金中增加了重的合金元素，则因密度增加所造成的损失必须要由强度上更大的提高来补偿。

在目前的飞机燃气涡轮发动机中，一些部件变得愈来愈复杂，设计的要求是材料应有更高的刚性，而加工操作则要求材料具有更高的韧性，这也是需要解决的矛盾。

美国近年来发展了一些含氧特别低的合金，以便在低温使用时具有良好的韧性及缺口敏感性，称为 ELI (意为“间隙式元素极低”) 级合金。一般钛合金中含氧约为 0.20% (重量)，但在 ELI 级合金中则低到 0.13% 以下。现在正式生产 Ti-6Al-4V ELI 及 Ti-5Al-2.5Sn ELI 两种合金，前者可用于液氮温度 (-196°C)，后者可用于液氢温度 (-253°C)。这些合金用于火箭中作为高压容器。由于这类合金中间隙元素含量极低，因此在常温时强度也稍低，制造容器时需要增加壁厚以提高其室温负荷能力^[25]。

由于钛和液氧或高压的气态氧接触时可能发生猛烈的反应，引起燃烧及爆炸，因此目前还不能用于钛合金制造盛氧的容器^[26]。在这方面还需要进行研

究探索。

(2) 在化工方面的应用

钛由于具有良好的耐腐蚀性及机械性能，是制造化工操作设备的重要材料。用钛制造的部件主要是与下列几种介质接触：①氯化物——如海水、盐卤的处理，有机合成中含有氯化物的催化剂，含有氯离子的工业流体的冷却系统，制造氯气的阳极等。②硫酸——如阳极化及电镀溶液，水法冶金中的矿石浸出，制硫，电解精炼金属时的阴极等。③硝酸。④其他。在这些应用中不锈钢往往会发生严重的应力腐蚀破裂，而钛及钛合金则具有极佳的抗力（当钛及钛合金材料表面出现缺口时，在氯化物水溶液中也会发生应力腐蚀破裂，需要加以注意）。

在化工设备中常用钛制造热交换器。由于需要保持热交换器壁很薄，因此必须防止材料的腐蚀。由于这个原因，其中的管状及板状设备常用钛来制造。用钛比用其他材料所制管壁厚要薄，对于一般的工作条件，钛管的管壁正常厚度为 1.0 毫米 (0.04 吋)，在高温应用时则需增至 1.5 毫米 (0.06 吋)。

钛制热交换器的成本仅为用不锈钢所制同类设备的 1.2 倍。

用钛管所制的螺旋管 (Coil) 可以用于进行加热和冷却，其优点是重量轻，特别是当这种螺旋圈状的管需要时常移动或者附着在容器的盖子上时，降低重量更为重要。

用钛制造化工设备中的大型容器也是一项重要用途。在低温使用时，通常是将碳钢容器衬上一层

钛的薄板以防腐蚀。衬板的厚度通常为 1.0 毫米。在较高温度使用时所衬钛板厚度为 1.5 毫米。但在高温时,这种衬钛容器时常会造成严重事故。由于钛的热膨胀系数比钢约低三分之一,因而当容器中发生热胀落时产生应力,造成衬层断裂。目前用于高温的反应塔都用全钛制造,系用 5—10 毫米厚的钛板焊接而成,塔高可达 18~30 公尺。

这种衬钛的钢板可以用爆炸接合方法制造。在焊接这种复合钢板时必须将钢焊好而不让烧热的钛受到空气的污染。

对于重型化工容器曾经发展了一种反衬的方法。首先将大约 4 毫米厚的钛板焊成一个钛壳,再将钢的衬层构筑在其外面。这个方法的优点是在建造时,可以从两面焊钛。

钛已经大量用于化工设备中的阀、泵、压力计、蒸馏盘及管道等的部件。

在使用过程中,应当注意钛吸氢而产生氢脆的问题。将钛中含铁量控制在 0.05% 以下,往往可以避免设备遭受破坏。在这一方面日本曾经做了较多的工作,并正式生产一系列低铁的纯钛及钛合金。

(3) 在海洋方面的应用

钛对海水具有极高的耐腐蚀性,因此是用于海洋环境的理想材料。美帝海军方面对于舰艇的钛合金进行了大量研究发展工作。1964 年后发现带有缺口的钛合金试样在海水中会遭受严重的应力腐蚀破裂^[8],因此近年来他们在钛的应力腐蚀破裂方面也做过很多研究工作。例如 Ti-7Al-2Nb-1Ta 合金具有中等强度以及良好的加工成形及可焊性,是美帝原来考虑用在潜水艇及其他舰体上的主要板材材料。但是这个材料对海水的应力腐蚀抗力不佳,经过研究后,发现在其中加入少量钼并将铝含量稍稍降低后,其机械性能没有什么改变,但可以不受海水中的应力腐蚀破坏,现在定型的合金成分是 Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo。美帝海军准备采用的其他钛合金还有 Ti-6Al-4V、Ti-7Al-2.5Mo 等,作为建造船体的材料。钛合金还用来制造浮球、流通海水的管道、阀门、泵以及枪炮等。用钛制造的管道可以代替常规的铜基合金管道,且具有强度高、重量轻以及能经受高的水流速度等优点。

参 考 资 料

- [1] J. Metals, 20[3], (1968), 10.
- [2] Metal Progress, 94[3], (1968), 60.
- [3] Цветный металлы, (1969) № 1, 90; № 2, 92.
- [4] Light Metals age, 26 [9, 10], (1968), 5.
- [5] Light Metals age, 26 [9, 10] (1968) 12.
- [6] Modern Metals, 25 [10], (1970), 127.
- [7] Титановые сплавы для Новой Техники, (1968), 62.
- [8] Space/Aeronautics, 48 [5], (1967), 90.
- [9] Met. Eng. Quart, 8 [3], (1968), 1.
- [10] Metal Progress, 96 [5], (1969), 121.
- [11] Metallurgia, 77, (1968), 231.
- [12] PB 191241, (1957).
- [13] BM-R1-7269, (1969).
- [14] Light Metal Age, 25 [1, 2] (1967), 6.
- [15] J. Metal, 20 [10], (1968), 32.
- [16] ASTM STP 432, (1968), 227.
- [17] ASTM STP 432, (1968), 236.
- [18] Met Eng. Quart, 8 [3], (1968), 10.
- [19] Met. Eng. Quart, 8 [3], (1968), 15.
- [20] Light Metal Age, 26 [9, 10]. (1968), 8.
- [21] Metal Progress, 95 [3], (1969), 65.
- [22] Metal Progress, 95 [3], (1969), 69.
- [23] Materials Research and Standards, 3, (1963), 810.
- [24] Metal Progress, 95 [1], (1969), 19.
- [25] Materials Eng., 68 [1] (1968), 24.
- [26] Proc. 4th National SAMPE Symposium, (1962), Article 16.

附表1 美、英工业钛合金的规格、性能和应用

额定成分(%)	合 金 牌 号		生 产 型 材 种 类	典 型 型 拉 伸 性 能 (a)				应 用 和 特 性					
				试材 状态	室 温 性 能		高 低 温 性 能						
					F(c) 公斤/毫米 ²	σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²		δ (%)	σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²	δ (%)	
工业 纯 钛 99.5 Ti	Ti-35A, IMI 115	—	坯、棒、厚板、薄板、带、管、线、挤压型材	退火	10470/8500	26.7~31.6	19.0~24.6	30~40	316	14.0~17.5	7.0~10.5	32~50	飞机骨架；化学、海水淡化及船用部件；板型热交换器；冷旋钻及冷压部件；钎焊阳极；成形性良好。
99.2 Ti	Ti-50A, IMI 125	4902A, 4941, 4942, 4951, 4951A	同 上	退火	10500/8650	38.6~42.1	31.6	25~28	316	19.6~21.0	9.1~12.6	37~45	飞机骨架，飞机发动机，船舶及化工部件；热交换器；冷凝器及蒸发器管，成形性良好。
99.1 Ti	Ti-65A, IMI 130	4900A, 4900B	同 上	H16	9840	76.0	68.8	17	—	—	—	—	化工，船舶，飞机骨架及飞机发动机部件；成形性、强度、可焊性及抗蚀性好。
99.0 Ti	Ti-75A, IMI 155	4901B, 4901C, 4921A	同 上	退火	10540/8780	49.2~52.6	42.1	23~25	316	22.4~23.2	13.3~14.0	33~35	化工，船舶，飞机骨架及飞机发动机部件；高速风扇；气体压缩机；成形性及抗蚀性良好，强度高。
98.9 Ti	Ti-100A, IMI 160	4921	坯、棒、线、挤压型材	退火	10890/8850	70.3	52.7	17	316	30.2~30.9	15.4~18.9	18~28	飞机发动机部件；飞机骨架，化工及船舶部件；气体压缩机，高速风扇；在工业纯级中具有最高的强度。
α级(包括准α级) 0.2 Pd	Ti-0.20Pd, IMI 260	—	坯、棒、厚板、薄板、带、管、线、挤压型材	退火	10470/8640	38.6~43.5	31.6~32.3	25~27	316	19.6~21.0	9.1~12.6	30~37	化工设备；在温和的还原介质，或介质在氧化与还原间变化时具有良好的耐蚀性。
5Al, 2.5 Sn	Ti-5Al-2.5 Sn, IMI 316	4910D	同 上	退火	11240/9420	87.8	82.2~84.3	13~18	316	57.6	45.6	13	飞机发动机的压气机叶片，导管等可焊部件及薄板件；汽轮机叶片；具有良好的可焊性，以及在316~538°C时的强度良好；在高温时稳定性好。
5Al, 2.5 Sn (低氧)	Ti-5Al-2.5 Sn ELI	4909, 4924	同 上	退火	11240/9420	77.3	66.7~73.8	15~20	—253 —196 316	160.9 126.5 54.8	144.8 118.1 42.1	15 16 20	专用于低温高压容器；使用温度可低至-253°C。

续表

额定成分(%)	合 金 牌 号	生 产 型 材 种 类	典 型 型 性 伸 性 能 (a)					应 用 和 特 性							
			试材 类型	材 状 态 (b)	室 温 性 能		高 低 温 性 能								
					E(σ) 公斤/毫米 ²	σ _b 公斤/毫米 ² σ _{0.2} 公斤/毫米 ²			δ (%)	δ (%)					
8Al, 1Mo, 1V C-110 AMV	Ti-8Al-1Mo-1V, C-110 AMV	坯、棒、厚板、 薄板、带、线、 挤压型材	4915	薄板	退火 (c)	13000/12650	105.4~ 112.4	98.4~ 105.4	10~18	316 427 538	77.3 67.4 56.2	59.0 50.6 42.1	20 17 20	用于工作温度高达 454°C, 并需要有高强度的飞机骨架 及喷气发动机部件;具有良好 的蠕变强度及韧性;可焊性 好。	
			薄板	退火 (f)	—	98.4~ 101.9	91.3~ 97.0	10~15	—	—	—	—	—		—
			薄板	退火 (g)	—	98.4~ 105.4	91.3~ 99.8	10~13	—	—	—	—	—		—
			棒材	退火 (h)	—	94.9~ 99.1	87.8~ 91.3	12~18	538	61.8~70.3	49.9~ 56.2	15~20			
5Al, 6Sn, 2Zr, 1Mo, 0.25 Si	RMI 5621	坯、棒材	—	棒材	退火	11600	98.4	91.3	10	316 427 538	77.3 70.3 53.8	56.2 52.7 49.2	16 16 18	喷气发动机部件;在 538°C 以下有较高的蠕变强度。	
			—	薄板	退火	11950	91.3	84.3	13	316 427 538	69.7 52.7 49.2	47.1 42.1 38.6	10 10 16		
6Al, 2Nb, 1Ta 0.8Mo	RMI 6Al- 2Nb-1Ta- 1Mo	坯、棒、厚板、 薄板、带、线、 挤压型材	—	薄板	退火 (i)	10820/8500	63.2	52.7	24	316 482	41.4 38.6	26.0 24.6	30 35	具有高韧性;中等强度;良 好的抗海水及热盐应力腐蚀 性;可焊性好。 飞机发动机旁路及热空气导 管, 气体压缩机及泵部件, 船 舶系统;具有中等的强度, 延 性及可焊性;可以时效硬化。	
			—	棒材	SHT+ 时效 (j)	11240/9490	77.3	62.5	24	316 482	61.1 49.9	44.9 37.2	23 21		
2.5 Cu	IMI 230	坯、棒、厚板、 薄板、带、线、 挤压型材	—	棒材	同上	—	80.8	63.2	24	316 482	66.0 52.0	47.1 36.2	25 31		
			—	棒材	SHT+ 时效 (q)	—	105.4	92.7	17	316 538	73.1 63.6	59.0 51.3	14 19		
6Al, 5Zr, 1W, 0.3Si	IMI 685 IMI 684	坯、棒材	—	棒材	SHT+ 时效 (s)	—	105.4	92.7	17	316 538	73.1 63.6	59.0 51.3	14 19	喷气发动机的叶片, 涡轮及焊 接转子;可以焊接;中等强度的 棒材锻造后有高的抗蠕变性。 喷气发动机的叶片, 涡轮及焊 接转子;可以焊接;中等强度的 棒材锻造后有高的抗蠕变性。	
			—	棒材	退火	11240/8990	80.8	67.4	28	316 482	52.0 37.9	35.8 24.6	22 33		
$\frac{\alpha+\beta}{2}$ 级 2Al, 2Mn	IMI 315	坯、棒材	—	棒材	退火	11240/8990	80.8	67.4	28	316 482	52.0 37.9	35.8 24.6	22 33	用作飞机发动机中压气机叶 片材料。	
			—	棒材	退火	11600	105.4	94.9	12	427	73.8	59.7	17		飞机骨架及其他结构部件; 飞机发动机的压气机叶片, 盘, 隔片及紧固件等;汽轮机 的压气机及涡轮叶片及盘;具 有良好的抗蠕变性。
			—	棒材	SHT+ 时效 (k)	11600	130.0	115.9	10	—	—	—	—		
			—	棒材	SHT+ 时效 (n)	10400/9700	111.7	100.5	18	316 482	87.8 82.9	68.8 60.8	18 19		
2.25 Al, 11Sn, 5Zr, 1Mo, 0.2 Si	Ti-679, IMI 679	坯、棒材	4974	棒材	SHT+ 时效 (u)	—	125.8	135.4	12	316 482	98.4 90.6	71.7 63.9	14 14		

额定成分(%)	合 金 牌 号		生 产 型 材 种 类	典 型 型 拉 伸 性 能 ^(a)					应 用 和 特 性		
	工业牌号	AMS No.		试材 类型	状态 ^(b)	室 温 性 能		高 低 温 性 能			
						σ_b 公斤/毫米 ² E(σ) 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ² δ (%)				
2.25Al, 11Sn, 4Mo, 0.2 Si	IMI 680	—	坯、棒材	SHT+ 时效(v) SHT+ 时效(w)	138.4 11030/9420 —	118.1 15 97.7 13	316 108.9 482 —	84.3 73.1 —	15 13 —	飞机的结构锻件; 压气机及 涡轮盘及叶片; 超声波探头等; 具有高强度及深度淬透性。	
3Al, 2.5V	RMI 3Al- 2.5V, C-80AV	—	薄板、带、管 材	带、 管材 CW+SR	63.2~ 70.3 10540/9130 —	56.2~ 59.7 73.8 10	316 45.6~49.2 427	31.6~35.1 28.1	12~25 15	飞机的液压管道, 箔材; 具 有综合的强度, 可焊性及成形 性。	
Ti-4Al- 3Mo-1V, C-115AMo V	4912, 4913		薄板、厚板、 带材	薄板 退火 SHT+ 时效(m)	91.3~ 98.4 11600/9840 —	84.3 12~15 108.9~ 117.4	316 427 538 45.6	57.6 52.0 38.6	18 19 35	航空及空间结构部件; 具有 良好的成形性, 高强度及热稳 定性。	
4Al, 4Mo, 2Sn, 0.5 Si	IMI 550	—	坯、棒材	SHT+ 时效(n)	125.8 11380/9910	112.4 15	316 482	73.8 62.2	18 21	飞机发动机的压气机盘及叶 片; 飞机结构部件; 汽轮机叶 片等。	
4Al, 4Mo, 4Sn, 0.5 Si	IMI 551	—	坯、棒材	同上	142.0 11380/9910	126.5 13	316 482	105.4 98.4	80.8 71.0	18 18	飞机结构部件; 兵器; 超声 波探头; 汽轮机及压气机盘及 叶片。
4Al, 4Mn	IMI 314	4925 B	坯、棒材	退火	105.4 11670/10260	100.5 23	196 316 482	172.2 85.0 70.3	165.2 21 54.1	6 32	飞机压气机的叶片和盘; 结 构锻件; 紧固件。
6Al, 2Sn, 4Zr, 2Mo	Ti-6Al- 2Sn-4Zr- 2Mo	4975, 4976	坯、棒、厚板、 薄板、带、线、 挤压型材	退火 薄板 薄板、带材	91.3~ 94.9 11600	84.3~ 87.8	538	68.8	52.7	26	喷气发动机的压气机部件及 外壳; 飞机骨架蒙皮等部件。
6Al, 4V	Ti-6Al- 4V, IMI 317	4911 A, 4928 A, 4935 B, 4954 A, 4965, 4967 A	同 上	退火	97.0 11600/9490	89.9 12	196 316 427 538	168.7 70.3 63.2 49.2	158.8 63.2 52.7 42.1	8 17 18 30	火箭发动机外壳; 飞机涡轮 及压气机盘及叶片; 结构锻件 及紧固件; 压力容器; 气体及 化学用品; 低温部件; 兵器 设备等。
		SHT+ 时效(o)		119.5 11240	108.9 8~15	316 427 538	77.3 66.7 52.7	15 18 22			
6Al, 4V (低氧)	Ti-6Al-4V ELL, C-120 AV ELL	4907, 4930	同 上	退火 薄板	94.9 11600/9490	80.2 15	253 196 316	186.2 154.6 73.8	175.7 144.1 66.7	6 14 12	温度低至 -196°C时的低温 高压容器。