

内 容 简 介

本文集反映了近三年来我国钛科学和钛工业发展的概况及有关的科研成果。内容包括：1. 钛科学与钛工业的发展动向，2. 钛合金化、相变、强度、腐蚀、疲劳、蠕变、断裂、形变及微观机理研究，3. 关于海绵钛生产、钛的熔炼、铸造、压力加工与热处理工艺研究及新技术开发，4. 钛的机械加工、焊接、成形、腐蚀防护、钛设备制造，5. 钛在航天、航空、海洋开发、化工、医疗等部门的应用。

本文集供从事钛合金生产与科研的工程技术人员和使用钛和钛设备的有关技术人员阅读，对大专院校有关专业的师生也是一本很好的参考书。

本文集分册出版。

钛科学与工程

第六届全国钛及钛合金学术交流会文集(1)

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京昌平兴华印刷厂印刷

(北京昌平崔村乡真顺村)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16 ·印张22 ·字数535千字

1987年9月北京第一版·1987年9月北京第一次印刷

印数1—1910

统一书号：15175·871 定价：6.15元

ISBN 7-5022-0017-7/T·1

第六届全国钛及钛合金学术交流会组织机构

组织委员会:

中国有色金属学会
中国有色金属工业总公司钛技术开发中心
国家科委新材料专业组
稀有金属情报网
陕西省有色金属学会

本届交流会筹办单位:

宝鸡稀有金属加工研究所
宝鸡有色金属加工厂

执行委员会:

主席 李青云 宝鸡稀有金属加工研究所所长
宝鸡有色金属加工厂厂长
副主席 孙文川 广州有色金属研究院副总工程师
秘书长 殷为宏 宝鸡稀有金属加工研究所副所长
委员 (以姓氏笔划为序)
马福康 北京有色金属研究总院院长
许嘉龙 上海钢铁研究所所长
李 东 中国科学院金属研究所代室主任
李志义 宝鸡有色金属加工厂副厂长
周 廉 宝鸡稀有金属加工研究所副所长
周景新 沈阳有色金属加工厂主任

办公室负责人: 唐仁波 涂增晃 杨昭苏

秘 书: 黄文媛

征文组负责人: 邓 炬 张树启 孙洪志

文集编审组:

组长 张太贤 宝鸡稀有金属加工研究所

成员 孙文川 广州有色金属研究院
张兆岑 北京有色金属研究总院
耿庆余 沈阳有色金属加工厂
陈克修 上海钢铁研究所
耿殿奇 东北工学院
张树文 中国科学院金属研究所

全桂彝 宝鸡有色金属加工厂
韩传玺 宝鸡稀有金属加工研究所
伍本德 宝鸡稀有金属加工研究所
易毅刚 宝鸡稀有金属加工研究所
吴以琴 宝鸡稀有金属加工研究所

出版说明

第六届全国钛及钛合金学术交流会征文组共收到来自全国 67 个单位的 288 篇论文。为了做到在开会前完成文集的编辑出版工作，收到论文后立即组成了文集编审组，于 1987 年 3 月 28 日至 4 月 6 日及 4 月 8 日至 5 月 5 日分两阶段在宝鸡稀有金属加工研究所对所有的论文进行了评审。根据出版要求、论文质量和照顾到钛研究的各个领域的内容有适当比例的原则，共选出 170 篇论文编入文集，其余论文以摘要形式收入。文集分三卷，共约 140 万字。中国有色金属工业总公司科技部副主任刘雅庭同志为文集撰写了绪言。第一、二卷共收入论文 122 篇，其内容除介绍我国钛工业现状和钛应用现状与发展前景的两篇论文放在卷首外，所有论文按内容分为五个部分，依顺序编排。第三卷收入了 48 篇论文和 104 篇摘要。

这次会议所收到的论文数是历届会议最多的一次。这说明近几年来我国的钛工业发展到了一个新的水平。因为出版条件的限制，未能将所有的论文全文收入文集，是一件憾事，借此机会，向有关作者表示歉意。

由于时间仓促，更限于编审人员的水平，文集可能存在不少问题和错误，敬望阅读该文集的同志们批评指正。

文集编审组

绪 言

自1973年10月宝鸡全国第一届钛合金学术交流会以来,已历经五届。这些学术活动对推进我国钛的科学研究和钛工业的发展起到了重要作用。第六届钛合金学术交流会将对第五届会议以来取得的成果进行广泛交流,并探讨今后的发展方向。在这次会议上交流的论文分类收入本文集,这无疑是一部珍贵的学术文献。

我国钛资源丰富,储量居世界前列。钛工业是在国家重点安排下,依靠自己的力量发展起来的。1955年开始研究海绵钛的生产工艺,1958年建成第一个海绵钛生产车间,50年代末形成海绵钛工业生产能力,60年代相继建成一批海绵钛厂,从而有充足的原料进行钛材加工工艺和应用研究。

1957年,北京有色金属研究院开始进行钛及钛合金的熔铸与加工工艺及设备的研究。60年代初国内第一个钛及其合金熔铸与加工车间在沈阳有色金属加工厂建成,同时也在抚顺钢厂进行钛材的工业性生产试制工作。在此基础上,1965年开始设计和建设我国第一个大型稀有金属加工厂和研究所。该厂、所建成后,我国钛材生产的技术水平和生产能力迅速提高。

全国第一届钛合金学术交流会后的14年中,钛及钛合金在熔铸、压力加工工艺、粉末冶金、铸件、成型与焊接以及推广应用等方面的研究工作有很大进展。在熔炼方面,除研制了等离子电弧炉、大型真空自耗电弧炉外,钛及其合金的熔铸工艺有了很大改进,如控制海绵钛粒度、改变混料方法、用等离子焊接电极代替钨极氩弧焊等,从而提高了钛铸锭的质量。例如,宝鸡有色金属加工厂熔炼的 $\phi 322 \times 2250$ (mm) Ti-6Al-4V铸锭,剖面253个点的成分分析无一点超差,该厂生产的Ti-6Al-4V铸锭获国家金质奖。通过对钛合金加工工艺、组织与性能关系的研究,以及新设备、新工艺的应用,钛材质量有了显著提高。钛工作者开发成功多种耐热、耐蚀、高强钛合金,并获得工业应用。等温锻造、精密模锻、静液挤压、超塑成型等新工艺的研究也有所进展。多孔钛管,钛板和致密钛制品如泵、阀及异形件等,钛的粉末冶金制品投入批量生产。在设备方面又成功地研制成大型凝壳炉,可铸造大型钛泵、阀及异形制品。还研制成功大型等离子氮化设备,低压等离子喷涂钛设备。在其它方面,如对钛及其合金的力学性能、物理性能、腐蚀与防护等也进行了广泛研究。我国生产的钛锭和钛材已有部分出口。总之,在此阶段我国钛材生产的工艺技术与装备水平有了很大进步。

1983年以来,国家对钛工业采取扶植政策,使钛材的生产及钛设备制造得到迅速发展。1973年生产的钛合金牌号有21种,现在工业生产及试生产的钛合金和工业试验钛合金共有45种,已列入国家标准的有18种。现有的产品品种可满足国民经济各部门的需要。近年来海绵钛计划调拨价格降低27%,钛材价格平均降低31%。工艺技术的进步为钛材的推广应用创造了良好的条件。通过科研、设计、生产、设备制造和应用部门的大力协同,钛材在航空、航天、造船、化工、石油、冶金、电力、轻纺、机械、制盐、制药、食品及医疗等方面的应用不断向深度、广度发展,并取得显著的经济效益。

我国钛工业虽然有了较大发展,但与发达国家相比,还存在一定的差距。钛工作者要更好地总结过去,重视钛工业的发展动向,结合实际需要加强新合金、新工艺、新技术、新设备的研究,努力提高质量,增加品种,降低消耗及成本,不断开发新的应用领域,充分利用钛的优良性能,推动“第三金属”的发展,为科技进步,为四化建设做出更大贡献。

中国有色金属工业总公司科技部副主任 刘雅庭

目 录

第六届全国钛及钛合金学术交流会组织机构

出版说明

绪言

我国钛工业的现状与展望.....李青云(1)

我国钛的应用现状与发展前景.....于淑健(11)

一、原材料、熔炼、铸造及加工

联合法制取海绵钛工艺研究.....徐 博(19)

镁热共还原法制取海绵Ti-Mo合金.....赵德厚等(27)

稀释氯气对含钛物料氯化的影响.....汪 珂等(32)

真空电弧和真空双电极电弧重熔钛锭组织的比较.....许嘉龙等(38)

钛合金的主要合金元素在铸锭中的分布.....窦永庆(43)

我国钛合金精铸技术发展的回顾与展望.....谢成木(48)

用于钛铸件的水玻璃铅砂铸型的研究.....徐 发等(56)

氢处理细化Ti-6Al-4V合金铸造组织的研究.....潘 峰等(63)

钛精铸制壳用新材料、新工艺的研究.....沈桂荣(69)

钛合金陶瓷型精密铸造工艺研究.....周彦邦(76)

热等静压对铸造Ti-10V-2Fe-3Al合金组织和性能的影响.....薛志庠等(82)

环形钛铸件的离心铸造工艺及其质量分析.....甘敬霖(87)

钛及钛合金牌号鉴别述评.....王锡柱(92)

用简易光谱法快速鉴别纯钛及钛合金.....唐慧琪、杨国器等(97)

高温锻造对TC6钛合金显微组织的影响.....张志方(102)

钛合金锻造时中心温度升高的研究.....杜忠权(108)

Ti-6Al-4V下连杆锻件的研制.....史宏德(114)

TC4钛气瓶的 β 锻造与 $(\alpha+\beta)$ 锻造的比较.....孔祥震(121)

不同锻造工艺对TC11盘形锻件组织与性能的影响.....杨兆岚(124)

TC11钛合金饼坯等温锻造工艺参数优化及室温机械性能与工

艺参数间的关系.....苏祖武、杨昭苏等(130)

高温高强钛合金大型压气机盘超塑性等温锻造工艺研究.....刘建宇、夏诚敬等(138)

TC1钛合金冷轧板材的研究.....周景新(142)

换热器用钛板研究.....戚 辉(146)

高强TB2钛合金箔材及其应用研究.....张 翥(149)

TB2钛合金棒材冷锻螺栓影响成型因素的分析.....张国才(155)

退火对Ti-2Al-1.5Mn合金冷轧薄板精细组织及氧污染的影响.....何明、王惠芳等(159)

二、粉末冶金、爆炸复合及焊接

- 高质量HDDH法 TC4 粉末的研究.....唐仁波(169)
一种新型耐蚀钛合金.....李棣泉等(172)
钛铝金属粉末间的偏扩散成孔作用.....蔡一湘(178)
微孔钛合金种植牙根的研究.....张正德等(186)
工艺因素对医用钛纤维多孔材料性能的影响.....伍本德等(191)
PREP法Ti-6Al-4V粉末钛合金的显微组织状态.....郑月秋等(196)
多孔钛板在粉末静电喷涂中的应用.....赵昌森(203)
高强钛合金的爆炸焊接新方法.....张军良(207)
钛-不锈钢爆炸焊接过渡接头的疲劳性能.....裴大荣(212)
熔池停留时间对钛合金焊接气孔的影响.....王者昌(216)
钛板超塑成型/扩散连接组合工艺研究.....钛合金SPF/DB课题组(220)
加中间层钛合金扩散焊.....张玉祥(227)
非真空扩散焊及其在多孔钛材焊接中的应用.....刘世青(232)

三、腐蚀、防护、成型制造

- 低压等离子喷涂Ti-Ni涂层.....王德政等(243)
钴镍电积用钛阳极的研制.....张招贤等(248)
钛的表面气体氮化.....邓振英等(256)
Ti-6Al-4V合金的气蚀损伤研究.....崔树国等(264)
钛材在流动海水中的耐蚀性.....李长彦(269)
钛合金彩色阳极氧化及其抗接触腐蚀性能.....彭仁明等(275)
铝对钛合金污染的研究.....陈 铮等(281)
工业纯钛在硝酸己二酸混合介质中的耐蚀性.....张连第等(285)
钛合金框电阻加热拉弯成型工艺研究.....王玉庭(291)
钛合金板金件超塑成形.....王儒润(296)
钛和钛合金拉深成形性评价方法.....陈春奎等(301)
用于钛合金磨削、铣削的新型切削液的研制.....韩玉生等(306)
制碱工业用钛泵的设计和制造.....韩术杰等(312)
铸造钛合金CO₂透平压缩机叶轮的研制.....韩荣轩(315)
钛在电解质溶液中的氢脆.....辛湘杰(318)
钛合金在海水中局部腐蚀性能研究.....朱相荣 蔡学章等(325)
钛板的各向异性对成形性的影响.....周维贤(333)
化工钛设备开发趋势.....王文治(338)

我国钛工业的现状与展望

李 青 云

(宝鸡稀有金属加工研究所)

(宝鸡有色金属加工厂)

我国关于钛的研究、开发、生产和应用，迄今已有30年的历史。尽管在这30年里，钛工业发展的道路是坎坷不平的，但由于从事钛工业的广大科技工作者，在钛工业的各个领域中进行了大量的工作，取得了许多的成就，终于奠定了我国钛工业的基础。特别是第五届全国钛合金学术交流会以来，我国的钛工业又发展到一个新的水平。在这些工作和成就的基础上，加速我国钛工业的发展应该说是有条件的。

一、我国钛工业的现状

1. 资源与海绵钛的生产

我国钛的资源非常丰富，储量居世界前列，在已探明的近百亿吨矿石储量中， TiO_2 的含量约8亿吨。这是发展我国钛工业非常有利的条件。

同世界各国一样，镁还原制取海绵钛是目前获得金属钛原料的基本方法。用镁还原法制取海绵钛的工厂目前有4家，即遵义冶炼厂、抚顺铝厂、上海第二冶炼厂和锦州铁合金厂，年产量约3000吨。质量符合国标要求，一、二级品率可达90%以上。但与国外先进水平比较，还有一定差距(表1)，如能耗高，炉型小，杂质含量特别是铁氧的含量高，硬度值高。这样，难于满足要求杂质含量低的特殊用途(如板式换热器用钛薄板)的需要，同时也影响残钛的加入量。此外，海绵钛的粒度也满足不了熔炼的要求。

近年来，在镁钛制取工艺，特别是攀枝花钛资源的综合利用方面所开展的研究工作和工业试验，取得了多项成果。如密闭电炉连续熔炼高钛渣技术，稀盐酸浸出制取人造金红石工艺，高钛渣无筛板沸腾氯化或熔盐氯化制取四氯化钛技术，以及联合法制取海绵钛工艺等，

表1 海绵钛生产有关技术经济指标与国外的对比

项 目	单 位	中 国 (抚顺铝厂)	美 国	日 本
液 氯	吨/吨钛	4.51	3.5	3.3
补充金属镁	吨/吨钛	0.319	0.25	0.08
金属实收率	%	71.4		84.9
劳动生产率	吨/人年	1.5	13	15
能耗*(包括镁能耗)	度/吨钛	51246	32075	30000
精四氯化钛	吨/吨钛	4.298		4.072

* 采用钛精矿为原料，美国和日本采用天然金红石为原料。

都已进行了半工业性试验。这些工艺的进一步完善,必将促进我国海绵钛的发展。

钠还原钛国内前一段也进行过工业生产,并用钠钛加工出不少钛材,其质量与用镁钛生产的钛材差不多。钠钛的优点是N、Fe、C杂质的含量低,颗粒细。但由于钠钛含氯离子高,粉尘大,在电极制备和熔炼过程中,沾污和腐蚀设备,因而不受加工厂的欢迎,生产处于停顿状态。

熔盐电解制取金属钛的工艺,还在开展研究工作,离进入工业生产阶段尚远。

2. 钛的熔炼和铸造

国内铸锭生产全部采用真空自耗电弧炉熔炼工艺。具有铸锭生产能力的共有8个单位,1吨以上的真空电弧炉9台,实际从事工业化铸锭生产的单位只有4家。年生产能力约3000吨,铸锭最大尺寸为 $\phi 711$ 毫米,重3.3吨。电极焊接过去采用钨极氩弧焊,由于这种工艺有造成钨夹杂的危险,从1980年开始,逐步被等离子焊所代替。

钛锭的表面质量近年来有了明显的改进。成品率由原来的89%提高到93~98%。

钛锭的内部质量最主要的缺陷是夹杂和偏析。近年来,由于对海绵钛的粒度、混料方法、电极焊接工艺采取了一系列控制措施,锭子内部质量有明显提高。纯钛锭和Ti-6Al-4V锭的质量是有保证的。从对1980年解剖的 $\phi 622$ 毫米Ti-6Al-4V锭的成分偏差和结晶形貌分析的结果可以证明这一点。分析了253个点,无一点成分超差。但对于高合金化和含高熔点合金元素量大的合金铸锭,由于过去生产量少,在生产过程中可能会出现某些需要进一步研究解决的问题。

我国的钛铸件开发开始于1964年。目前从事钛铸件研究与生产的单位有7家,用于铸钛的凝壳炉共8台,炉子最大容量为200公斤,多数为25~50公斤。造型方法多为机加石墨型和合脂粘结剂的捣实型,水溶砂型也已投入使用。历年来,主要是为化工部门生产各种钛泵、钛阀等产品,获得了广泛应用,取得了明显的经济效益。也为航空和舰艇等部门试制过一些铸件,应用效果良好。钛铸件生产的主要问题是造型技术落后。

国内开展精密铸造研究的单位有航空部北京航空材料研究所、上海钢研所和沈阳铸造研究所,并且掌握了石墨-酚醛树脂壳型和陶瓷壳型两种精铸造型技术,试制出了多种在飞机上应用的铸件,研究了精密铸件加热等静压处理的工艺,提高精铸件的质量。

3. 残钛的回收利用

钛加工厂按现在的工艺生产加工材,产生的残钛约占投料量的40%左右。残钛回收利用的程度是影响加工材成本的关键因素之一。经过多年的工作,残料回收利用取得了很大成效,已经解决了残料的快速鉴别、破碎、去氧化皮、除油、去除高密度夹杂、加入残料的电极制备方法以及熔炼工艺等一系列问题,形成了一套完整的残料回收利用工艺,使得各种形状的残料能达到回收利用。在纯钛锭中,残钛的加入量已达到18%。利用这套工艺,已回收残钛1000多吨,从而使金属的利用系数达到1.5左右。除了自耗电弧炉回收残料外,用等离子炉、凝壳炉回收残料也积累了一定的经验。氢化法回收和电子束炉熔炼回收也做了一些工作。同时,残料的利用已扩展到炼钢、炼铝工业等领域。这样,各类残钛都有回收利用的出路。加工厂的残钛回收利用已基本解决。

4. 加工材的生产

目前国内从事钛加工材生产的单位主要有4家。加工材的生产能力当前完全决定于铸锭的生产能力。钛加工材的年产量已达到1000吨以上。工业生产的合金牌号18个,工业试生产

合金16个(见表2)。尽管当前钛加工材的80%以上是纯钛,但历年来对列入国标的合金和工业试生产的合金进行过大量的研究试制工作,只要有需要,这些合金都可按照要求进行生产。加工材的品种有板、带、箔、棒、管、丝以及各种饼、环锻件(见表3),多数属于中等规格的产品。近年来国际上增长较快的钛宽厚板、用于焊管的成卷钛带、大型锻件和各种型材等,国内尚需增添设备,进行技术改造,才能生产。但是规格的大型化和品种的增加是有潜力的,只要有需要,钛加工厂可以设法解决。

在钛加工的发展过程中,我们不仅形成了国际上生产上述合金牌号和品种、规格的常用的一套工艺,而且还发展了铸锭直接挤压,防氧化涂层,电解去除氧化皮,管材温轧,钛铜复合棒及爆炸复合与轧制等工艺。这些工艺多数已在生产中获得实际应用。如用爆炸复合-轧制工艺生产了数百吨钛-钢复合板,使用效果良好,在配合钛材推广中起了重要作用。

主要产品的质量是好的。从目前国内加工产品的结构来看,以纯钛板、纯钛管为主,二

表2 我国钛及钛合金一览表

序 号	名 义 成 分	类 型	备 注
1	碘 法 钛	α	工 业 合 金
2	工业纯钛	α	工 业 合 金
3	工业纯钛	α	工 业 合 金
4	工业纯钛	α	工 业 合 金
5	Ti-3Al	α	工 业 合 金
6	Ti-4Al-0.005B	α	工 业 合 金
7	Ti-5Al	α	工 业 合 金
8	Ti-5Al-2.5Sn	α	工 业 合 金
9	Ti-5Al-2.5Sn-3Cu-1.5Zr	α	工 业 合 金
10	Ti-2Al-1.5Mn	$\alpha+\beta$	工 业 合 金
11	Ti-3Al-1.5Mn	$\alpha+\beta$	工 业 合 金
12	Ti-5Al-4V	$\alpha+\beta$	工 业 合 金
13	Ti-6Al-4V	$\alpha+\beta$	工 业 合 金
14	Ti-6Al-1.5Cr-2.5Mo-0.5Fe-0.3Si	$\alpha+\beta$	工 业 合 金
15	Ti-6Al-0.6Cr-0.4Fe-0.4Si-0.01B	$\alpha+\beta$	工 业 合 金
16	Ti-6.5Al-3.5Mo-2.5Sn-0.3Si	$\alpha+\beta$	工 业 合 金
17	Ti-6Al-6V-2Sn-0.5Cu-0.5Fe	$\alpha+\beta$	工 业 合 金
18	Ti-8Cr-5Mo-5V-3Al	β	工 业 合 金
19	Ti-0.2Pd	α	工业试生产合金
20	Ti-8Al-1Mo-1V	近 α	工业试生产合金

续表

序 号	名 义 成 分	类 型	备 注
21	Ti-11Sn-5Zr-2.25Al-1Mo-0.25Si	近 α	工业试生产合金
22	Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.25Si	近 α	工业试生产合金
23	Ti-7Al-4Mo	$\alpha+\beta$	工业试生产合金
24	Ti-6Al-2.5Mo-2Cr-0.5Fe-0.3Si	$\alpha+\beta$	工业试生产合金
25	Ti-4Al-3Mo-1V	$\alpha+\beta$	工业试生产合金
26	Ti-3Al-2.5V	$\alpha+\beta$	工业试生产合金
27	Ti-5Al-4Mo-4Cr-2Sn-2Zr	$\alpha+\beta$	工业试生产合金
28	Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr	$\alpha+\beta$	工业试生产合金
29	Ti-10Mo-8V-1Fe-3.5Al	β	工业试生产合金
30	Ti-10V-7Mo-2Fe-1Zr-4Al	β	工业试生产合金
31	Ti-15Mo	β	工业试生产合金
32	Ti-32Mo	β	工业试生产合金
33	Ti-2.5Cu	α +化合物	工业试生产合金
34	Ti-0.3Mo-0.8Ni	α +化合物	工业试生产合金

表 3 钛及钛合金加工材的主要品种、规格

品 种		规 格 (mm)
板 材	冷 轧 板	0.3×(400~1000)×3000 (0.5~4.0)×1000×3000
	热 轧 板	(4.0~10.0)×1000×3000 (8.0~30.0)×2000×3000
带 材		(0.1~0.3)×(100~320)×L
箔 材		(0.01~0.09)×(100~320)×L
饼 材		直径≤600, 厚度>40
棒 材	挤 棒	(ϕ 12~100)×L
	轧 棒	(ϕ 8~60)×L
	锻 棒	最大到 ϕ 250, 旋锻棒 ϕ 3~ ϕ 5
管 材	轧 管	(ϕ 3~ ϕ 120)×11000
	挤 管	(ϕ 18~ ϕ 210)×L
丝 材		(ϕ 0.1~ ϕ 6.0)×L

者约占加工材的80%。板、管的生产工艺成熟，质量稳定。特别是纯钛无缝管，无论是规格、质量或者成本所达到的水平与国际先进水平相当。但钛合金，特别是某些高合金化的钛合金的加工产品因为需要量少，生产实践的机会少，所以工艺上的成熟程度较之纯钛产品要差，但可以有把握地说，只要有一定数量的比较稳定的市场，任何一种工业生产或者试生产牌号的合金的加工产品都是可以在短期内生产出来并达到国标或用户所提的要求的。

5. 成本与价格

国内钛加工的规模小，生产工艺和设备相对地说还比较落后，各项技术经济指标都赶上国外先进水平是有较大困难的。但是在“六五”期间，为降低钛加工材的成本在两个方面取得了明显的进展：一是完成了残钛回收工艺，降低了海绵钛的消耗系数，大大减少了原材料的成本。二是通过改进熔炼、锻造、挤压和轧制工艺，使加工材的成品率提高了4%以上。同时，由于我国钛加工材的主要品种是与国外先进水平相差不大的纯钛管板，再加上国家对钛工业的发展采取了一些扶植政策，几年来，我国钛材连续降价达30%。当前，加工材的价格基本上与国外相当，有的甚至比国外的低（见表4）。

表4 钛加工材价格比较

用途	牌 号	美 国		中 国		
		规 格 (mm)	单 价 (美元/公斤)	规 格 (mm)	单 价 (元/公斤)	备 注
航空用材	Ti-6Al-4V	φ63.5(棒)	20.5~22.1	φ65~70	100	新产品订货价
		12.7×914 ×2438(板)	17.7~21.0	20×800×2000	90~100	出口报价
一般工业用材	二级工业	1.98×1219 ×3048(板)	19.86	1.56~2.1 ×1000×3000	62	
		12.7×2438 ×6096	17.7~20.6	10.6~15.6 ×1000×3000	51	
	纯 钛	φ25.4×0.5 (有缝管)	22.0	φ25.0×0.6 (有缝管)	~119	

6. 新合金及新工艺的研究与进展

钛合金的研究包括新合金的创制和常用合金深化研究两个方面。60年代以前，以实验室研制为主，开展了小规模工业扩大试验。1970年制定了我国第一个钛合金标准，包括21个合金牌号。进入70年代以后，新合金研制和老合金深化的工作同时进行。在这一阶段，对常用的Ti-6Al-4V合金的深化研究下了很大功夫。国内主要研究和生产单位通力协作，对该合金的成分范围、熔炼加工工艺、相变、组织和性能等进行了全面研究，确定了锻造、轧棒、挤棒、精锻棒和板材的工艺，建立了金相组织分类评级图，测定了锻件、棒材全面性能，基本上掌握了该合金的成分-工艺-组织和性能之间关系的规律性，为该合金在航空和其他工业上的应用奠定了良好的基础。对一些重要合金，如BT9、Ti-679、Ti-230、Ti-7Al-4Mo、BT8-1、Ti-4Al-3Mo-1V、Ti-3Al-2.5V、Ti-5621S、Ti-0.2Pd、Ti-0.3Mo-0.8Ni、Ti-32Mo、Ti-451等，在研制的同时进行了工艺、组织和性能之间关系的深入研究。

新合金创制主要开展了高温、高强、高韧、耐蚀和功能材料的研究,创制了不少新的合金。在高温合金方面,通过对 α 和 β 稳定元素、少量添加剂以及稀土元素对近 α 合金影响规律的探讨,获得了在550℃具有好的抗蠕变性和好的热稳定性相匹配的合金。如Ti-633G、Ti-53311S和HTi-2Y等试验合金,性能与IMI829相当(见表5),并且在研制过程中提出了控制合金热稳定性的电子浓度理论。高强钛合金方面研制成功了TB2、Ti-22、Ti-4721三个亚稳定 β 合金,并进行了扩大试验。Ti-Ni记忆合金的研究已进入到应用阶段。尽管多数新合金暂时难于生产和应用,但在创制新合金过程中所做的大量工作对我国钛合金的进一步发展是有重要意义的。

表5 耐热试验合金主要性能指标

试验合金	室 温 拉 伸				550℃拉 伸			
	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ (%)	ψ (%)	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ (%)	ψ (%)
Ti-633G	975	892	13.6	25	632	504	15.9	35.5
Ti-53311S	1040	932	11	19	736	500	15	48
HT ₁ -2Y	1135		12.5	23.3	852		11.4	37.7
IMI829*	950	820	9	18	590	460	12	25

试验合金	蠕 变 变 形(%)	热 稳 定 性*			
	550℃ 100小时	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ %	ψ %
Ti-633G	0.144/300MPa	1018	1000	12.3	186
Ti-5311S	0.15/300MPa	1049	970	7	12
HT ₁ -2Y	0.154/274MPa	1169		7.3	10.8
IMI829 *	0.1/300MPa	950	820	7	12

* 热稳性值是550℃300MPa100小时暴露后的拉伸性能IMI829合金所示高温拉伸、蠕变和热稳定性均是540℃下的值。

在新工艺方面也进行了大量的研究工作。这里所称的新工艺主要是指近净形(Near Net Shape)工艺,包括精密铸造、等温锻造、粉末冶金成型、超塑性成型和扩散连接等。由于这些工艺能大大提高材料利用率,降低钛制品的成本,在国外越来越受到重视。所有上述新工艺,国内都开展了试验工作,并且有不少论文在这次全国钛会上发表。如等温锻造的TC11合金压气机盘,不仅掌握了工艺,且已在发动机上应用。用超塑性成型扩散连接技术加工的形状复杂的风动泵舱门,已装机试飞。粉末冶金方面,采用等离子旋转电极和氢化脱氢工艺都制得了含氧量低的优质预合金粉末,经热等静压成型所得到的棒材,性能同熔炼加工材相当。

在新材料、新工艺研究中,值得指出的是,近十余年来,国内开发了一种钛微孔材料,产品品种包括无缝和有缝微孔钛管、钛板、钛带以及各种异型件。在开发这种材料的过程中,发展和采用了粉末轧制、等静挤压、增塑挤压和模压等4种成型工艺。这类微孔材料具有强度和硬度高、耐热、耐蚀、抗震、能焊接等优良的综合性能,在许多领域应用已获得了很好的效果。这类材料作为钛材的一个分支,进一步改进工艺和降低成本,还是有发展前途的。

7. 钛材的应用

我国钛工业的发展在很长一段时间主要目的是为了满足不同航空工业的需要。但直至“六五”计划以前，由于各种原因，发动机和飞机上使用的钛材很少，钛部件的重量仅占飞机结构重量的1~2%。但“六五”期间，钛在航空工业上的应用有了新的发展（见表6）。如

表6 国产钛合金在飞机宇航部门应用情况

使 用 合 金	应 用 领 域 和 部 位
TC4	歼8-2承力件、卫星、火箭气瓶
TC6	WP13原喷口液压筒
TC11	WP13、WP13A盘叶片
TA7(d)	WP13WP15 前机匣、通讯卫星
TB2	卫星与发射火箭连接带
2T3、2T4	WP13铸造机匣支撑座

TC6、TC11合金作为盘件、叶片和其他部件在发动机上应用已有了批量生产，经受了试飞考核。TA7合金环轧件、模锻件和板材分别用于发动机机壳体、转接座、衬板、支架座和壁板，都已通过了长期试车和试飞。TC4在机身上作为承力件，TB2和Ti22作为铆钉丝的应用都取得了很好的效果。尽管航空部门目前用钛不多，但是多年来所开展的大量试验工作，特别是“六五”期间，由于计划落实，几种合金的试验和应用都取得了成果，为今后航空工业用钛打下了比较坚实的基础。

国内钛材的市场从70年代中期就开始转向一般工业。十几年来，由于科研、生产、设计、制造和应用部门的密切配合，已较广泛地用于化工、石油、冶金、电力、轻纺、食品及医药卫生等各个部门（见表7）。钛制设备的主要类型是换热器、各种容器、泵类、风机和

表7 化学工业各部门用钛比例

化 学 工 业 部 门	钛 设 备 比 例 (%)
氯碱（包括氯酸钾）	25
化学纤维、化肥	18
无机合成、塑料	20
基本有机合成	15
染料中间体	4
精细化工	3
其 它	15

电解槽等。由于钛设备的使用，收到了很大的经济效益。根据国内使用钛材情况的调查，每使用1吨钛材可以获得5万元的经济效益。据初步估算，从1984年到1986年上半年，各工业部门采用钛设备已获得1.3亿元的经济效益。

钛材在工业部门的广泛推广应用，较大地推动和促进了我国钛工业的发展。1983年以前，钛材产量曾经多年徘徊。自这一年的全国钛材推广应用会议以后，每年都有较大幅度的增加，1983年比前一年增长44%，1984年增长36%，1985年增长42%，连续三年的平均增长

率为40%。1986年保持了继续增长,预计今年的产量还会有新的增加。

二、我国钛工业的展望

经过30年的努力,我国钛工业无论是从原料-加工-制造或者是从科研-生产-应用来看,都已形成了一定的规模,打下了良好的基础。特别是近几年来有了较大的发展,令人鼓舞。我国的国民经济已走上了正常发展的轨道。“七五”期间和本世纪末以前,我国的工农业生产将会按照发展计划保持连续稳定的增长。毋庸置疑,作为航空和一般工业不可缺少的金属钛,也必将有相应的发展。据了解,今后几年,原来应用钛材已有成功经验的几个行业,如烧碱、纯碱、化肥、冶金、有机合成等,都将新增较大的能力,预计用钛量将在2000吨以上。国外用钛已较成熟的领域有,电力、舰船、海洋开发、海水淡化、石油开发、汽车和建材等,国内有的只是初步推广应用,大多数还未进行应用的开发工作,潜力很大。航空工业用钛在“六五”工作的基础上,今后将有稳步的增长。更主要的是,钛是一种只有40年历史的新型金属,人们对它的认识和开发利用还只是初步的。它的各种优异的甚至是奇特的性能,决定它在各个领域应用具有强大的生命力,只不过是待人们去开发而已。我们应当乘我国国民经济发展的有利形势,利用钛工业已经具备的基本条件,利用我国丰富的资源,进一步推动钛工业的发展。在“七五”期间,使钛加工材产量增长50%,本世纪末钛加工材的产量增长1~1.5倍,并使各项技术经济指标全面达到目前国际水平,是完全可能的。

下面我想就我国钛工业未来的发展谈几点个人的意见。

1. 应进一步加强推广应用工作

回顾国内外钛工业的发展历史可以看出,钛工业生产所遇到的每一次大的挫折,都是与经济萧条,航空工业和其它工业用钛量大量减少紧密联系在一起。我国钛工业近年来之所以有较快的发展,正是狠抓市场开发的结果。需求是发展的前提,这是一条重要的历史经验。因此,进一步加强推广应用,是发展钛工业的决定性因素。

钛在一般工业上的应用要继续大力推广的另一重要原因是,钛制设备通常是“半永久”或“永久”型的,用得越成功则随后的用量越来越少,这就要求我们不停地寻求和开发新的应用领域。为了配合在一般工业领域的推广应用,要大力发展在各种介质中具有好的抗腐蚀性的耐蚀合金,研究各种腐蚀机理,积极发展民用钛的品种和规格,增强钛设备制造能力等等。

钛在航空工业上的应用,从长远观点看,仍然是决定我国钛工业能否有突破性发展的关键。应当巩固“六五”期间航空用钛的试验成果;科研、生产和制造单位,应继续密切配合,稳步开发钛材在发动机和飞机结构上的应用,在新合金、新工艺研究上要开展有前瞻性的预研项目。对宇航、兵器工业用钛的开发工作也应予以重视。

鉴于我国钛工业已有的基础和部分产品所达到的水平,还应通过各种渠道使我国的钛材进入国际市场。

2. 积极扩大海绵钛的生产 进一步提高海绵钛的质量

国内4个镁钛生产厂的能力都是千吨以下的,规模很小。国外海绵钛厂,一般都在5000吨级以上。据分析,5000吨级以下的厂经济上是不合算的,而万吨级的厂,生产成本可降低10~15%。应根据我国的具体条件,迅速扩建或新建大型海绵钛厂。国外镁法钛的还原-蒸

留联合工艺已实现工业化生产。据称能节约能耗20%以上,降低成本15~30%,产品硬度可低至80HB。我国联合工艺试验已扩大到炉产2吨的规模,节约能耗达25%,成本下降16%,只是在产品质量上还存在一些问题,应抓紧实现工业生产。同时要提高生产效率,改进质量,降低成本。

3. 抓紧实现钛加工厂的技术改造

为了扩大钛加工的生产能力,增加品种和规格,形成我国较完整的钛加工体系,必须针对目前钛加工厂存在的问题,采用新技术、新工艺、新设备进行改造。前几年,技术改造有了一些进展,今后几年内要继续实现原定的改造方案。钛加工厂要装备大型电弧炉,增大熔炼能力;装备大型的先进的锻造机,增加铸锭开坯和锻件生产能力;迅速实现钛带和焊管的生产,以满足制造各种冷凝器的急需。同时要考虑实现宽板和中厚板生产的方案。在改造过程中尽量引进先进技术,并在工艺上实行与之配套的改革。通过改造,做到设备先进,工艺先进,效率高,品种、规格全,质量稳定,成本进一步降低。

4. 继续改进生产工艺,努力发展新工艺,力求进一步降低钛材成本

虽然人们称钛为发展中的“第三金属”,但那毕竟只是一种预言。当前,钛仍然是一种新型金属,尚未进入普通的工业金属行列。据1981年统计,钛的销售金额在金属中只占第15位。影响钛工业发展的主要原因是由于钛的高成本妨碍了它的应用。有人指出,从海绵钛生产到钛的最终制品的每一步成本的重大降低和在降低基础上的扩大应用,是钛成为一种主要工业金属的先决条件。所以,降低钛制品的成本,是钛的冶炼、加工和使用部门共同的任务。

降低钛制品的成本,可分长远和近期两个目标:

长远目标是,在钛的冶炼领域里发展能耗低、流程简单并能连续化生产的新工艺,比如,用多年来研究的电解制取金属钛的工艺等,彻底取代现有的镁还原工艺;在加工领域里实现大型化和连续化,这样才能大幅度降低钛材成本。发展这类工艺需要大量投资,目前钛市场还较小,付诸实施有很大困难,但不能放弃这方面的开发研究工作。

降低成本的近期工作是,迅速实现海绵钛生产的大型化,完善生产过程中镁、氯的循环,提高单炉产量和采用联合法等。钛加工厂要进一步完善残钛回收利用工艺,建立生产线,在“六五”攻关基础上继续改革工艺中不合理的部分,把成材率从现在的水平再提高6~8%。发展成本低的铸件生产。在加工厂发展钛设备制造,以便更容易实现回收制造过程中产生的残料。继续开发钛-钢之类复合材料,降低钛设备制造成本。钛材生产、科研和应用部门紧密配合,努力发展近型工艺,降低制造成本。

5. 科研与生产要紧密结合

在钛工业的发展过程中,培养了一支科技队伍,他们分布在钛的科研、生产、设计和应用各个领域,具有丰富的实践经验和较高的科技水平。这支队伍的人数和当前我国钛工业的规模相比,是相当可观的。这是除丰富的资源以外我国发展钛工业的另一优势。

为了充分发挥这支力量的作用,从当前来看,应当密切科研与生产的结合,促进科技人员把主要力量放在解决钛冶炼、加工和应用方面所存在的各种问题和开发国民经济近期所需要的合金和产品上,要在现有合金的基础上,根据我国的资源条件和各工业领域的需要,逐步建立我国自己的合金体系,推动钛工业的发展。同时,要用适当的力量,研究开发那些对钛工业的发展将产生变革性影响的长远性项目,以期在未来使钛成为真正的第三金属。

我们相信，只要我国从事钛工业的广大科技工作者能善于总结过去的经验和教训，利用现有的钛工业的基础和有利条件，在各个领域里努力工作，随着我国国民经济持续稳定的发展，我国的钛工业必将获得更大的发展。

我国钛的应用现状与发展前景

全国钛办 于淑健

钛是投入工业生产和应用较晚的一种新型金属。由于它所具有的优异的性能在现代技术发展中有着强大的生命力,所以是一种理想的结构材料。经过40年的发展,钛已在军事和民用工业中获得广泛的应用,有“空中”、“陆地”、“海洋”金属之称。

一、我国钛应用推广的历史和现状

我国钛的资源极为丰富,有着发展钛工业的良好物质条件。我国钛工业是50年代后期在自力更生的基础上发展起来的。目前,从钛精矿到钛白、海绵钛、钛材及钛制品,已形成了较完整的工业体系。30年来,不仅为国内许多部门提供了大量钛材及钛制品,而且还有部分钛产品进入国际市场。

回顾我国钛应用推广的历史可分为三个阶段:

1. 1964年开始向航空工业推广应用;
2. 1972年向民用工业推广应用;
3. 1982年7月成立全国钛应用推广领导小组,进一步加强钛在各行业的应用推广工作。

我国钛的应用是随着航空工业的发展而兴起的。1964年开始,为航空工业用钛,组织全国科技力量,进行了大量材料研究和应用研究工作,钛产品基本上能满足使用要求。1972年国家计委倡导将钛材用于民用,进一步促进了钛工业的发展。同年底,冶金部和化工部组成了“钛材推广应用调查组”,对北京和上海等地的应用情况作了调查。1974年10月在上海由冶金部、化工部和轻工部联合召开了“全国钛材应用推广经验交流会”,并编辑出版了《钛材应用实例选编》一书,向全国进行宣传。1975年,冶金部和三机部联合召开了“钛合金在航空工业推广应用落实会议”。1977年在广州又召开了“钛工业生产和钛材在湿法冶金中应用经验交流会”,并编写了《钛材在冶金工业中的应用》一书。1979年底至1980年初,冶金部和四川省联合举办了“攀枝花资源综合利用”展览,其中展示了钛的应用实例。

为了进一步促进钛的应用推广,1982年7月30日在国家经委领导下,成立了钛应用推广领导小组及其办公室。1983年4月及1986年10月两次召开全国钛应用推广会议。1983年国家对钛实行了一系列的扶植政策后,海绵钛两次降价(降价27%),钛加工材三次降价(降价31%),促进了钛的生产和应用。海绵钛不仅过去积压和库存的全部被用完,还消费了近4年生产的全部产品,当前已由滞销变为供不应求。钛材生产1983年到1985年平均每年以36%的速度递增。结束了多年徘徊的局面。1986年又继续增长。这几年,钛的应用推广每年为社会带来经济效益近两亿元。由于钛材降价,用户得到了实惠,免税也使钛材生产厂有利可得,各方面都受益,从而使我国钛的生产和应用走上了良性循环的轨道。