

# 钛金属市场前景及其 新兴生产技术

◇马廷灿 姜山 万勇 黄健  
中国科学院武汉文献情报中心

钛是一种重要的原材料,拥有一系列卓越的特性,比如高强度质量比、高温下的高强度、耐腐蚀和热稳定性等,使其成为机身结构材料的理想选择,在大部分军用机中占据了结构质量相当大的一部分。钛金属的未来市场预期除了需要考虑宏观层面的钛市场供应和需求趋势外,还需要考虑那些有助于降低钛生产成本的技术革新

的影响。  
品生产者价格指数(Producer Price Index, PPI)的变化情况(1982年的PPI为100)。

针对最近的需求激增,许多钛金属生产商宣布已经增加或即将增加其海绵钛产能。其中,中国海绵钛生产商的扩张最为引人注目,其海绵钛生产能力从2005年的9500t/a急剧扩张到2007年的4.5万t/a,增长幅度高达373%(参见图2)。日本海绵钛生

产商计划到2009年将产能扩张大5.2万t/a,比2005年的3.7万t/a提升约40%。到2011年,俄罗斯的海绵钛产能有望达到4.4万t/a。美国海绵钛生产商的产能从2005年的8940t/a激增到2007年的2.02万t/a,计划到2010年达到4.197万t/a。得益于进来钛价格的急剧提升,许多钛生产商现金状况稳健,因而得以能够进行大规模的资本投资计划。

## 一、钛金属未来市场预期

### 1. 全球海绵钛供应前景

2003-2006年间,钛的价格以前所未有的速度上升,长了1倍多。政府和业界观察人士表示,这是自第二次世界大战后发生钢铁短缺以来,全球性材料供应担忧第一次影响到国防部门;他们还指出,钛的供应短缺还可能会影响到军用飞机和武器的交付时间。虽然钛产品价格多年来一直在波动,但近年来的价格飙升远远超过了以前的价格波动。图1给出了1971-2006年间美国钛金属轧制成

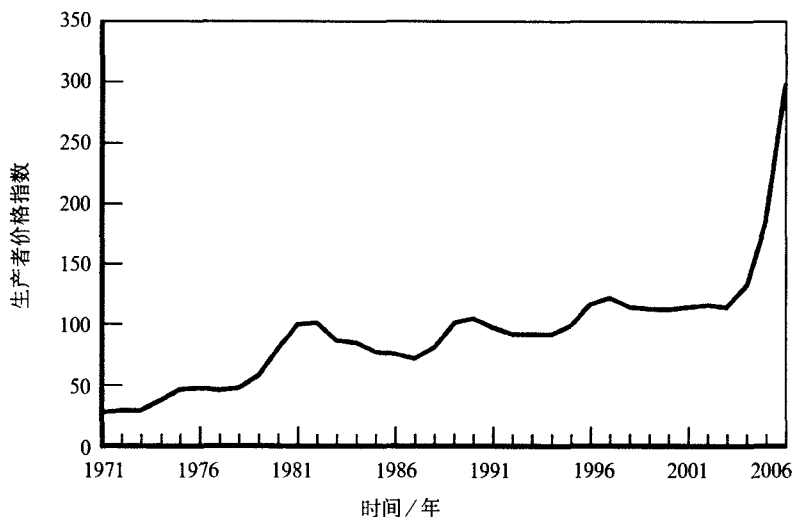


图1 美国钛金属轧制品生产者价格指数 (1971-2006)

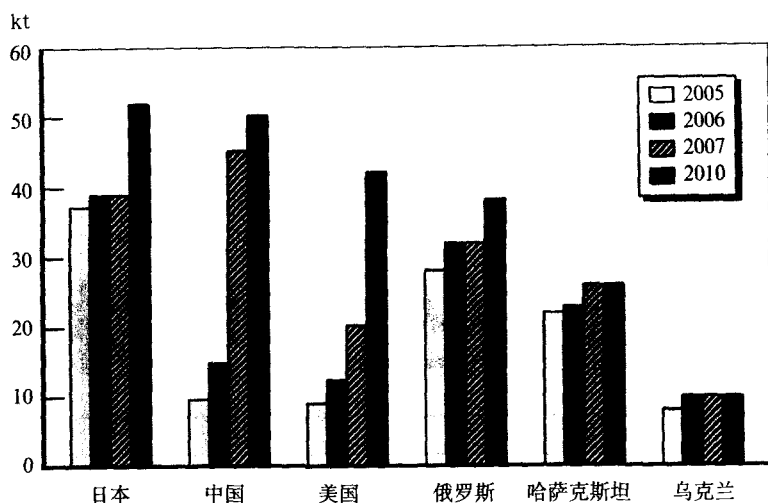


图2 全球海绵钛生产力的扩张

如果上述产能扩张计划进展顺利的话,到2010年,全球的海绵钛产能预计将达到2005年(11.35万t/a)的2倍,增长到大约21.8万t/a。如果新海绵钛工厂按照计划全面投入运行,到2010年,中国有望成为仅次于日本的全球第二大钛生产国,甚至有可能超过日本。美国和俄罗斯将紧随其后。

中国和美国能否顺利实现产能扩张是钛行业最为关注的焦点之一,如果乐观的需求预测在将来成为现实,这些积极的扩张计划将有助于钛金属市场达到一种供需平衡。然而,如果未来需求没有达到预期的话,它们将可能会引起严重的市场失衡,其中,中国对全球钛供应的影响最值得关注。中国对各种金属的需求及其产能扩张对于钛的供应来说是一张王牌,这种状况在不久的将来可能会持续下去,这主要是得益于中国庞大的经济及其快速、连续的增长。2003-2005年间,中国的钢铁行业消耗了大量的钛废料和海绵钛,推高了它们的市场价格,并激励了大量海绵钛工厂在中国的建设,然而中国钢铁需求增幅的轻微下降加上海绵钛产能的显著提升扭转了市场局势——2007年海绵钛的市场价

格下降了将近50%;针对这种市场形势,分析认为中国2007年后的产能扩张将会显著放缓。但是在不久的将来,中国随时可能会重新启动产能扩张计划,任何人都无法排除这种可能。

## 2. 未来的钛需求

### (1) 工业界的需求

2007-2010年,工业界对钛的需求增速预计将超过全球GDP的增速,增量将主要来源于钛在整个工业界中的更广泛应用。例如,近年来新兴钛买家(如石油和天然气装置、汽车、重型

车辆以及医疗设备行业等)的需求增长尤其引人注目——2004-2006年间大约增长了50%,由于这种显著增长,工业界对钛的整体需求在2004-2006年间增长了19%。展望未来,虽然钛工业应用的增长率预计将放缓,但专家预计2007-2010年工业界对钛的需求仍将增长14%~15%,年均复合增长率(CAGR)约为4%。

### (2) 商业航空的需求

基于波音和空中客车2005年和2006年创纪录的商用飞机订单,未来几年商业航空部门的钛需求量预计将迅速增长。根据The Airline Monitor杂志提供的数据,飞机交付量将快速上升,2005-2010年间年均复合增长率约为9%,然后放缓,直至2014年将再度上升(参见图3)。钛需求量的增长率会更高(年均复合增长率约为22%),这主要是由于每架飞机中钛含量的显著提升;钛需求量的快速增长主要是受到波音777、787和空客380等大型高钛含量飞机订单的驱动,到2010年,这3种高钛含量飞机将占到波音和空客商业飞机钛需求量的

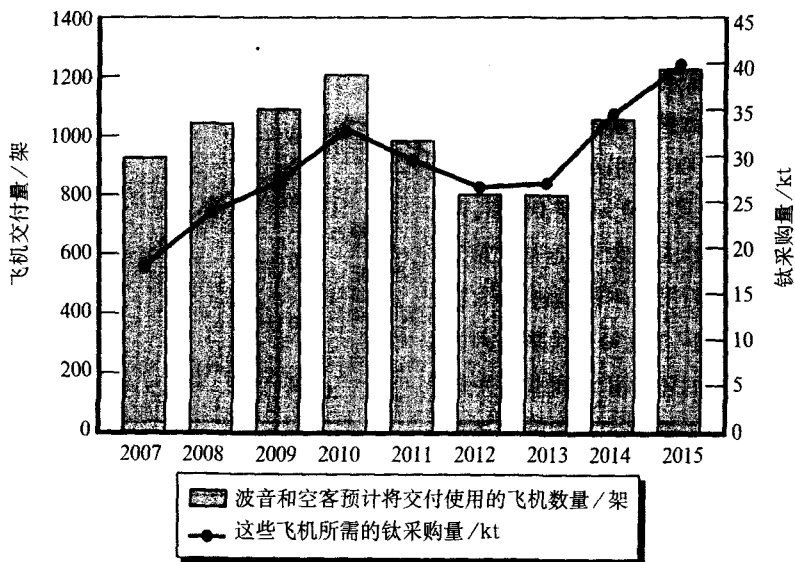


图3 预测飞机交付量与未来钛需求

一半以上。特别是波音 787, 每架所需的钛采购量(“Buy Weight”是制造一架飞机所需采购的钛质量, 与其相对应的“Fly Weight”是成品飞机中所含的钛质量, 两者之比称为“buy-to-fly ratio”, 即“BTF比”, 平均值约为 6:1) 大约为 91t; 根据 The Airline Monitor 的预测, 到 2010 年波音 787 的钛需求量将占到波音和空客商业飞机钛需求总量的近 30%。

### (3) 军用需求

随着全球军费开支持续增长, 军用武器的开发与采购不断向轻便、灵活方向发展, 因此军用钛需求量在未来将持续增加。C-17 和 F-15 等美国现有军用飞机项目将持续到 2010 年, 而 F/A-18 E/F 和 F-16 的生产有望持续到 2015 年; F-22 猛禽于 2003 年开始全速生产, 一直持续到 2009 年; F-35 于 2008 年开始低速试产, 预计第一批将于 2010 年交付使用; 未来 20 年中, F-35 的产量有望达到 3500 架。不过美国军用飞机的钛需求量预计将明显低于 2005 年, 这主要是由于 F-22 将停产, 而 F-35 直到 2010 年才会扩产。

假定 2005-2010 年间商用飞机钛需求的年均复合年增长率为 22% (如上所述), 那么航空钛总需求(包括商用和军用)的同期年均复合增长率估计为 15% 左右。表 1 给出了 2010 年的钛需求预测。

表 1 2010 年钛需求预测

	需求部门	折中	乐观	悲观
各需求部门的年均复合增长率 (2005 年为基准年)	航空	15%	20%	10%
	工业	5%	7%	3%
2010 年钛需求量 (基准年 2005 年的需求量均为 100)	航空	201	249	161
	工业	128	140	116
	总需求	159	187	135

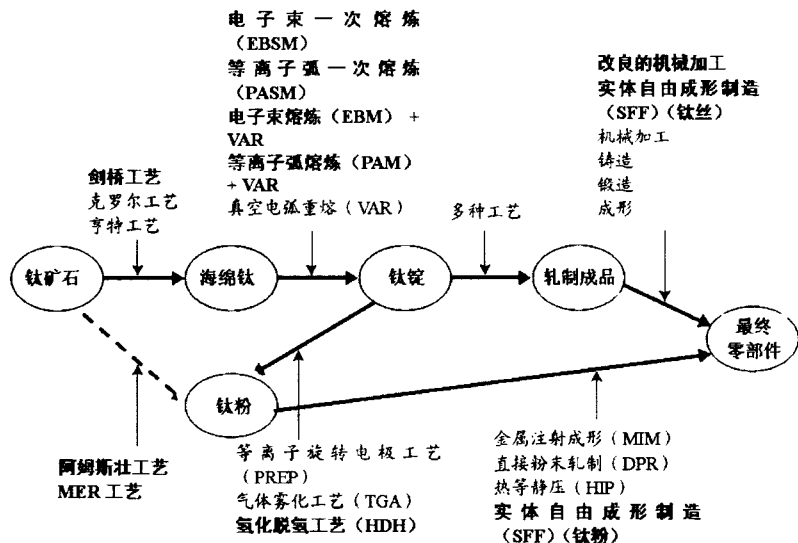


图 4 新兴钛生产技术

## 二、新兴钛生产技术

目前, 钛的精炼、加工和制作成本依然很高, 从每立方英尺的加工成本来看, 到达精炼阶段, 钛的成本比铝高 5 倍; 如果制成铸锭和制作成成品, 则钛的成本是铝的 10 倍。海绵钛是从钛矿石中提炼出的商业纯净物, 钛锭是用海绵钛、钛废料或两者结合生产的; 钛轧制成品, 如钛板、钛片、钛坯和钛棒等, 是由钛锭通过轧制和锻造等一次制作工艺制成; 钛部件则是由轧制成品通过锻造、挤压、热冷成型、机械加工和铸造等二次制作工艺制作成。

归纳起来, 钛的生产过程包括几个阶段: 钛矿石提炼成海绵钛, 海绵钛熔融、浇注成钛锭, 钛锭加工成轧制成品, 轧制成品制作成零部件。图 4 列

出了钛各个生产阶段的生产技术, 其中粗黑字体标记的技术为新兴技术, 实线表示一个已经确定的生产阶段, 虚线则表示一个潜在的生产阶段。

### 1. 改良的钛提取与精炼工艺

#### (1) 技术背景

许多研究人员正在为克罗尔工艺 (Kroll process) 寻找更快、所需劳动力和能源更少的替代工艺。剑桥大学附属公司 Metalysi (原名为 FFC) 开发的剑桥工艺 (Cambridge process, 又称“FFC 剑桥工艺”) 利用电解法来连续生产海绵钛。国际钛粉 (ITP) 公司 (已于 2008 年底被全球领先的钛白粉生产商 Cristal Global 收购) 开发的阿莫斯壮工艺 (Armstrong process) 通过连续低温还原四氯化钛来生产钛粉。杜邦公司和 MER Corporation 开发的 MER 工艺利用直接电解还原法生产钛粉。先进材料集团 (ADMA Group) 开发的氢化脱氢工艺 (HDH) 利用改良的克罗尔工艺用钛废料、屑和其它钛废弃物来直接生产钛粉。

值得注意的是, 这 4 种新兴钛提取与精炼工艺中有 3 种是用于生产钛粉。

目前,钛粉仅占钛年产量的极小一部分,是通过利用等离子旋转电极工艺(PREP)或气体雾化工艺(TGA)雾化轧制成品喂料制得的。由于只能用精炼钛来生产,所以钛粉及其昂贵,只用于高度专业化的应用,如医疗植入物等。一种能够直接从钛矿生产钛粉工艺的出现将会使钛粉便宜很多,也有可能使钛粉成为钛市场的一个重要部分。

### (2) 优势与挑战

所有这些新兴工艺都可以提高产量、降低能耗、减少资金投入,而且大多数情况下都采用连续化生产减少所需劳动力,从而降低成本。新兴钛粉生产工艺不需要VAR(真空电弧重熔)、EBM(电子束熔炼)或PAM(等离子弧熔炼)来生产最终零部件,从而省去了现有工艺中的许多步骤及相应的重大基础设施。

如果能成功应用的话,经新技术改进后的生产速度将扩大钛的市场供应量,大大缩短交货时间;能源和劳动力的节约也会使得钛金属价格下降,当然这在一定程度上取决于生产者的意愿;这些技术面临的主要挑战就是如何让它们得以应用。

### (3) 融入供应链

在上述4种新兴工艺中,仅有剑桥工艺是由主要的海绵钛生产商资助研发的,它直接用于生产海绵钛,相对于其它3种用于生产钛粉的工艺来说,集成到现有生产过程中会更加容易;另外,如果剑桥工艺可以用于粉末冶金,节约效果将会非常大。钛粉可直接作为海绵钛的一种代替品集成到现有供应链,但这将否定其大部分节约潜能,而且由于钛粉的高生产成本,这在商业上也是不可行的。只要这些新工艺中的任何一种取得成功,都将彻底改变几十年来一直是基于同一技

术、由少数几家公司主导的市场。

虽然新的提取技术可以为现有公司提供巨大优势,或者为该产业新兴力量的出现提供基础,但是利用这一优势将需要生产能力方面的大量投资。现有设施对于克罗尔工艺来说可能是最优的,如果想要利用新技术则需要全面更新;因此新提取技术很重要,但要进入市场却需要一定的时间。

### (4) 前景

虽然改良的精炼工艺可以显著降低生产成本,但大多数技术短期内不太可能获得成功应用。据业界专家称,剑桥工艺虽然已经商业化多年,但仍然受到那些尚未得到解决的技术壁垒的阻碍。阿姆斯特壮工艺多年来一直用于生产少量的钛粉,但直到目前还没有用于大规模生产,距离钛粉的商业化生产仍有一定距离。有些人认为MER工艺具有一定潜力,但目前尚处于开发初期,其前景仍不明朗。

氢化脱氢工艺最有前途,ADMA集团报道说正在寻求资金来扩大生产,专家认为这一工艺在数年后即可为美国陆军生产钛板。然而,由于其低成本优势主要是来源于钛废料的高利用率,该工艺不能完全取代克罗尔工艺。总之,钛提取与精炼工艺的技术变革有可能会长期出现,目前仍然存在技术不确定性。

## 2. 钛粉末冶金

### (1) 技术背景

钛粉末冶金(P/M)并不是一项新技术,更准确地说,它是一种完全不同的钛零部件生产方法:通过粉末冶金生产零部件,所用的是粉末而不是海绵钛。作为一种成熟的技术,它已广泛应用于其它金属,但在钛金属中的应用很有限。

粉末加工成零部件的方法有几

种:金属注射成形(MIM)是利用粘结剂将粉末粘结在一起,粘结剂在加热过程中去除;直接粉末轧制(DPR),粉末被轧制成片材,然后通过加热、烧结进行固化;热等静压(HIP)铸造工艺,粉末被加压、加热,形成近净形铸件。所有这些工艺都已成熟,目前已用于生产少量零部件。

### (2) 优势与挑战

粉末冶金可以限制与传统钛生产相关的浪费,不需要VAR(真空电弧重熔)、EBM(电子束熔炼)或PAM(等离子弧熔炼);粉末可以直接形成任何形状或轧制成品,产出更高。这一工艺也可以生产近净形零部件,减少传统零部件生产通常伴随的浪费,通过在几个步骤提高产出,粉末冶金减少了制造一个最终零部件所需的原材料。

不过,粉末冶金也确实引入了一些新的问题。第一个就是污染控制,它将对航空金属构成一个特殊的挑战,任何污染都将使金属不适用于航空零部件,所以加工必须是在洁净室环境中进行。此外,目前还很难用粉末制造大型部件,而这些部件占据了飞机用钛的重要部分。最后,钛粉是易燃、易爆物品,这可能对大量粉末的处理造成困难。

### (3) 融入供应链

虽然粉末冶金目前是一个小众市场,但经济型钛粉来源的出现将使这些工艺非常具有吸引力。航空设计的高结构标准使粉末冶金一时还难以出现在航空市场上,它可能会首先出现在军事地面车辆装甲中,其结构要求没有那么严格。尽管这不会直接影响到航空市场,但它可以通过减少海绵钛需求来降低价格。

粉末冶金最有可能作为一种新的轧制成品生产方法进入航空市场,

生产出的轧制成品可用于现有的制造技术,最终它可用于目前在机身中应用有限的近净形铸件和其它形式的生产。对粉末冶金的生产速度影响最大的将是材料认证,认证过程的费用和困难将致使各公司尽量避免在飞机中使用粉末冶金产品,除非它们在其它领域已有重要的应用历史。

#### (4) 前景

目前,粉末冶金在航空领域的主要应用是发动机制造,它曾用于生产可以承受发动机最热区域的极端条件的耐热合金,然而由于污染控制问题,粉末冶金通常是在没有其它办法可以生产所需合金时才会使用。此外,粉末冶金也用于制造军用飞机中的一些小零部件。

粉末冶金要在航空领域获得更广泛应用,需要钛及其轧制成品制造商在供应链源头进行大量的投资。钛粉很容易被污染,且易燃、易爆,相关安全处理知识和设施的开发可能需要数年。如上所述,钛粉对行业可能带来的影响取决于其廉价生产方式。

### 3. 一次熔炼工艺

#### (1) 技术背景

传统的钛生产工艺需要进行2~3次VAR熔炼,50多年来这已经成为了一种标准。近来的技术进展去除了多次熔炼,只经过一次电子束熔炼(EBM)或等离子弧熔炼(PAM)处理,生产出的钛即可满足多数航空应用的要求。

#### (2) 优势与挑战

一次熔炼工艺减少了一个熔炼步骤,在提高产量、节约时间和能源的同时,也比传统的真空电弧重熔(VAR)法生产速度要高。采用VAR两次熔炼法生产一批3~7t的钛需要超过20~25天的时间,而采用单次EBM熔

炼法可以在14天内生产出超过15t的钛。EBM和PAM工艺还可利用小块和纯度较低的废料,这将推动对回收钛的需求;虽然这2种工艺比较难以控制产品的化学组分,但这只是一个小问题而已。以上这些优势使得一次熔炼法非常适合大规模生产,尽管这种工艺并不适用于小批量的特殊合金制备。

#### (3) 融入供应链

一次熔炼法已经实现了商业化应用,不太可能引发市场发生太大变化。由于这种工艺需要主要钛生产商进行大量的资本投资,故而这一工艺还只是在缓慢地向市场进行渗透。不过由于钛的市场价格很高,生产商正在扩大产能,一次熔炼法有望在不远的将来成为新建工厂普遍采用的一种工艺。

扩大这类工艺应用的一个最大障碍是一次熔炼材料的认证。波音公司和TIMET公司已经就一次熔炼材料的标准进行了若干年的谈判,但仍没有达成一致,不过双方相信他们已经距离达成协议不远了,这意味着单次熔炼法的采用更多的是时间早晚问题。不过,即使一次熔炼法成功推广开来,客户依然可能无法在短期内享受到成本的下降,市场的供不应求会使生产商将节省下的成本当作额外利润予以保留,可能只有出现市场低迷后,成本削减才会传导到终端用户(包括飞机制造商)。

#### (4) 前景

长远来看,一次熔炼工艺将成为业界标准。虽然该工艺目前尚未被用于商业生产,但它已经在若干军事项目中有所应用,F-15战机的尾部构件就是采用单次熔炼材料制造的,静态引擎部件以及引擎压气机叶片也

是。对军事项目而言,认证并不是大问题,主要限制将在于一次熔炼法产能的扩大速度,以及价格竞争能够在多大程度上迫使主要生产商替换其VAR产能。

### 4. 实体自由成形制造

#### (1) 技术背景

实体自由成形制造使用点热源来融化连续层中的钛丝,制成复杂的三维零部件,此外钛粉也可用于制作这种部件。Arcam和AeroMet等许多公司都开发了这种技术,通常是采用电子束或激光束作为热源。

#### (2) 优势与挑战

这些工艺比现有的部件制造技术要快很多,需要的能源较低而产生的废弃物更少;尽管具有这些优势,但采用实体自由成形制造技术制造部件仍然比用传统技术制造的部件要贵,这主要是由于所需劳动力和技术等因素。这一技术主要适合于小部件的制造,它们只占航空材料的一小部分,有限的应用限制了其成本节约潜力和对军用飞机成本的影响。

#### (3) 前景

这种技术是由AeroMet公司与波音公司及美国国防高级研究计划署联合开发的,并在AeroMet公司得到示范应用。作为与波音公司合约的一部分,AeroMet公司对F/A-18战机的一些机翼部件进行了全尺寸地面测试,并且能够对它们的生产使用进行认证,虽然AeroMet公司已于2005年倒闭,但专家认为采用类似技术生产的部件已经在军用飞机上得到了应用。

### 5. 改良的机械加工技术

#### (1) 技术背景与优势

钛极难进行机械加工,其活性限制了工具表面的温度,因而也限制了

加工速度；此外，导热性能不佳也是一个问题；钛的硬度很容易快速磨损加工工具。以前，这些问题的存在使得加工成本几乎是原材料成本的2倍；近年来，一系列的进步大大降低了机械加工成本。例如，过去由于结构负荷的不确定性，零部件的设计通常需要有一些富余；现在借助电脑设计可以更好地进行分析，减少富余；部件加工也可预先分析，优化设计可以降低劳动力成本并提高产量。这些进步仍将持续下去，在不远的将来，机械加工成本还将不断降低。

## (2) 市场与前景

这些变化似乎是机械加工渐进、累积进步的结果，而不是单一技术创新的结果，这些进步源于接近供应链末端的零部件制造商的变化，它们包括波音、洛克希德马丁等主要的钛用户，也包括一些小规模的代工机械工厂。市场的多元化以及渐进的技术变革将推动创新的快速应用，这些创新将使最终零部件的制造成本呈不断下降的趋势，而不是突然的降低。在零部件生产中，很高的BTF比往往是高成本的根源所在，改进这一比例就像改进提炼、熔融、轧制成品生产的产出率一样，可以降低生产零部件所需的原材料量，开放资源关于这一领域的工作细节很少，但该领域似乎是航空公司的关注重点，尽管尚不清楚会出现什么变化，但有关BTF比的改进应当得到监测。

## 三、新兴技术在节约成本方面的潜力

为了使人们对上文所讨论的技改在期限、可行性、节约成本潜力等方面有一个更加理性的认识，兰德公司邀请相关行业专家尽可能准确地回答下列问题：这些新兴技术最早什么时候

表2 新兴技术的成本节约潜力

分类	技术	期限	可行性	成本节约能力
改良的提炼与精制技术	阿姆斯特工艺	中期	低	低
	剑桥工艺	中期	低	低
	MER工艺	中期	中	低
	氢化脱氢工艺	近期	中	低
粉末冶金	热等静压铸造	远期	高	高
	轧制成品粉末冶金	远期	高	中
	近净形粉末冶金	远期	中	高
一次熔炼工艺	冷床熔炼	近期	高	低
实体自由成形制造	实体自由成形制造	中期	中	中
改良的机械加工技术	多种	近期	高	高

可以应用于相关产业？这些技术被采用和商业化的可能性有多大？这些技术能够在多大程度上降低钛生产成本？

每项新兴技术应用的期限被评估划分为近期(1~3年)、中期(4~7年)和远期(8~10年)，可行性及节约成本潜力被评估划分为低、中、高三档。

需要注意的是，这些评估是针对普通钛市场的技术应用，并非只是航空市场。严格的认证要求和保守的工程学可能会阻碍一项技术在航空市场的应用，直到其在一般市场得到检验后多年。此外，成本节约是相对于目前应用的所有工艺，比方说，一项制造技术可能可以节约某种部件的生产成本，但这个部件可能仅占飞机所用全部钛的一小部分。与行业技术专家讨论的结果汇总于表2。

虽然改良的提炼技术独自带来的成本节约有限，但可以使得粉末冶金方法经济可行，这将产生更大的节约。目前，钛粉极贵，新兴的生产技术有望让其在将来比海绵钛更便宜，两大进展的结合(克罗尔工艺的改良替代工艺、经济可行的粉末冶金技术的发展)将会产生巨大的成本节约潜力，利用

其它新技术取代当前使用的一些昂贵的工艺也可以产生成本节约。改良的机械加工技术具有特别高的近期成本节约潜力。

一次熔炼精炼技术和改良的机械加工可小幅逐步降低生产成本，与改良的提取工艺和粉末冶金相比，这些改良方法的未来不确定性小，但生产成本的降低程度有限。在所有的新技术中，生产成本的降低将主要是通过减少浪费、提高产出来实现；劳动效率的提高将可以节约一些成本，特别是在零部件制造过程；能源节约非常重要，但却只占成本节约的一小部分，主要集中在于最初的提取和熔炼工序。

新兴技术有望大幅降低成本，开辟新市场，如军用地面车辆等，但在不久的将来不太可能挑战商用航空市场的主要地位。这些技术要想影响航空级钛的成本还需要许多年的时间，但是从长远来看，这些可以节约成本的进展将会真正拉低钛的价格，使钛成为其它金属的一种经济可行的替代品，用钛作为原材料有望带来新的产品创新，这反过来会引起钛需求量的巨大增长。