

专题报告

钛在汽车工业中的应用及降低钛材成本的工艺

杨遇春

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

[摘要] 叙述了钛在减轻汽车自重、节约燃油、保护环境、降低噪声、提高汽车性能方面的优势和应用领域及趋势。介绍并评价了几种降低海绵钛与钛材成本的工艺技术。

[关键词] 钛; 汽车用钛材; 钛冶金新工艺

[中图分类号] TF823; U462.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)08-0009-09

美、英发动以控制石油资源为背景的伊拉克战争, 导致2003年底油价开始上扬, 至2005年初突破了每桶60美元, 新的能源危机已成现实。作为全球第二大石油消费国, 2004年我国进口原油高达 $1.1 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$ 。油价的一路走高, 给我国的经济发展特别是汽车运输行业带来严重的后果。

自上世纪六七十年代油价攀升以及环保法规日趋严格以来, 要求汽车轻量化以减少油耗和控制排放的呼声日益高涨, 从而使汽车在大量使用高强度低合金钢(约占车体结构25%)的同时, 铝、镁、钛、玻璃纤维增强塑料等轻质材料在汽车结构中的用量也获得了不断提高(表1)。

表1 低密度材料减轻的车重^[1]

Table 1 Weight Savings for low density materials

低密度材料	被替换材料	质量减轻/%	相对成本/% (每个零件)
高强度钢	软钢	10	1
铝	钢, 铸铁	40~60	1.3~2
铝基复合材料	钢或铸铁	50~65	1.5~3*
镁	铝	25~35	1~1.5
钛	合金钢	40~55	1.5~10*
不锈钢	碳(素)钢	25~45	1.2~1.7
玻璃增强纤维	钢	25~35	1~1.5

包括材料成本和加工制造成本

1 铝镁钛已成为汽车的重要材料

20世纪初, 整个车辆的3/4均由钢和铸铁构成。为减轻车重, 目前大部分汽车的车身由高强度钢组成, 用量约占车重的25%。进入20世纪90年代, 汽车生产的高度发展, 其对石油资源的急剧需求及环保法规推向Euro-III, 大大加快了汽车轻量化进程。表1所列铝、镁、钛等轻金属材料已成为汽车设计首选的轻质材料。南非铝业联合会(AFSA)2003年的报告指出, 西方过去10年中汽车对铝的需求(主要为铸件)增长了3倍, 平均每辆车为120 kg, 按世界年产5 000万辆计, 全球汽车产业约需金属铝 $(600 \sim 700) \times 10^4 \text{ t}$, 已成为铝的最大用户。铝的来源主要靠废杂铝再生^[3]。而镁比铝轻1/3(比钢轻4/5, 比锌轻3/4), 由于比强度高, 自上世纪90年代以来, 镁在汽车零件生产中的用量年增长率平均为18%。镁在每辆车上的用量1990年不到1 kg, 2001年达到4.3 kg。估计到2020年福特、通用、戴姆勒·克莱斯勒三大汽车公司的每辆汽车上将使用100 kg以上的镁零件^[4]。

至于钛, 由于它兼有强度高、密度低、柔韧性好、反弹能力强、高温性能及抗蚀能力突出等特性, 更为镁、铝所不及(表2)^[5]。以比强度为例, 钛结构件的强度约为同重量钢结构件的3倍。因

[收稿日期] 2004-10-11; 修回日期 2005-05-18

[作者简介] 杨遇春(1933-), 男, 北京市人, 北京有色金属研究总院教授级高级工程师

此, 远在 50 年代中期通用汽车公司在涡轮发动机驱动的实验性 Firebird- II 号车型的外壳上全部使用了钛。这种车虽然一直未投产, 但后来演化为在高速赛车上使用, 用于保护车身防止空气摩擦引起的过热。此后钛材以其高比强和强抗蚀特性, 成为高端汽车一些关键零部件首选材料之一。但因其价格高昂 (表 3), 难于被广泛使用。通常, 汽车生产厂家除应对客户要求节约燃油, 减轻有害物排放, 降低噪声和提高安全性能外, 还必须满足因追逐舒适、豪华而对车型和汽车工作高性能的要求。对车型和高性能的要求是商家极为关键的两个销售因素。汽车上使用钛零件每减轻 1 kg 车重, 将降低 2.20 美元的批量生产成本, 4.50~7.70 美元的节油成本, 8.50 美元专用车和豪华车的成本。因此使用钛在投入成本和提高性能带来的效益之间的差距正在缩小^[7]。

表 2 汽车用金属材料的性能

Table 2 Chief properties of automotive materials

	质量	强度	强度/ 质量比	腐蚀指数 (海水中)	预期使用 寿命
钛	1.00	1.00	1.00	1.00	无限期
铝	0.57	0.29	0.51	0.36	2 年
钢	1.67	0.59	0.35	0.06	1 年
不锈钢	1.67	0.59	0.35	0.31	200 年

*表中所列除预期使用寿命外, 均为相对于钛的材料性质

表 3 钛在成本上与其它车用金属材料的比较^[6]

Table 3 Cost comparison of Ti and other automobile metal materials

	成本比较/美元·磅 ⁻¹			
	镁	钛	钢	铝
矿石	0.02	0.10	0.01	0.30
金属	0.10	0.68	0.54	2.00
锭坯	0.15	0.70	0.60	4.5
薄板	0.30~0.60	1.00~5.00	4.00~9.00	8.00~50.00

汽车上一般不用镁薄板, 每磅镁铸件的价格为 2.50~10.00 美元

20 世纪 90 年代末, 丰田成为第一个在批量生产中把钛发动机气门引入其系列车型中的厂家; 2000 年起, 德国大众在其生产的 Lupo FSI 紧凑型轿车中装备了用钛制成的后悬挂弹簧; 其后, 通用汽车公司在其生产的 Chevrolet Corvette Z06 运动车的排放系统上使用完全由钛制造排气消音器, 从而实现了数量颇为可观的钛零件的批量生产^[8]。

2 汽车零件中的钛

2.1 汽车发动机

动力传动装置的核心是内燃发动机。内燃机往

复运动式零件和转动式零件的质量严重地影响燃油是否节约。发动机的连杆对材料的强度、疲劳性能、刚度 (特别是大头端) 及耐磨性能都有严格的要求, 而钛的强度和疲劳性能更适合制造这些零件。钛连杆质量的减轻, 结合以质轻的活塞和活塞销, 使噪声、震颤、车身跳动明显减轻, 改善了发动机的工作性能。同时, 这些零件如果用钛制造, 还可以提高发动机的工作温度。活塞销要求材料具有一定的强度、耐磨性能、高刚度和耐高温, 目前最佳选择是密度低、高温强度高、生产成本相对不高的金属间化合物 γ -TiAl。对更高速度的发动机而言, 其气门传动机构也以使用抗蠕度、抗氧化的钛材为宜。尤其是使用 γ -铝化钛作气门弹簧, 除减轻质量, 还可将发动机速度提高 10%^[8,9]。

上世纪 90 年代末, 日本丰田汽车公司率先在中型家庭轿车 Altezza 上使用了钛发动机气门。丰田采用粉末冶金技术用 Ti-6Al-4V/TiB₂ 粉 (Ti-6Al-4V 内混入 5% TiB₂)。TiB₂ 起颗粒增强作用, 不但提高了材质室温和高温性能, 还提高了扬氏模量) 制造进气气门, 用 Ti-Al-Zr-Sn-Nb-Mo-Si/TiB₂ 制造工作温度较高的排气气门, Altezza 2-1 型发动机共有 16 个气门, 使用钛材约重 400 g (使用钢气门重约 700 g), 从而可依据减轻的质量缩减气门弹簧尺寸。

此外, 本田公司的 Acura NSX 的 V-6 发动机连杆, 日产公司 Infinite V-8 的发动机气门及雅马哈 250 CC 摩托发动机上的气门, 也都相继使用了钛材^[8,9]。

2.2 排气系统

主要由排气管和排气消音器形成的排气系统也是适于使用钛的领域。奥地利运动型摩托车制造厂 (KTM) 的 LC8 型摩托发动机 (Motocross) 的排气系统用钛制造, 其排气消音器的壁厚仅为 0.3 mm。减重带来使用年限的延长, 因而该系统成为最先投入批量生产的钛排气系统。美国通用汽车公司在其生产的 Chevrolet Corvette Z06 运动车的排放系统组件上全部用 2 级钛制造, 质量从不锈钢的 18.6 kg 下降为 11 kg。而钛零件的应用使车的使用年限达到了 12~14 a, 而使用不锈钢只有 7 a。

2.3 弹簧

钛具有较低的弹性模量 (表 4), 更确切地说其切变模量约为钢的一半, 当使用钛做弹簧, 低的模量和密度与许用应力相结合, 弹簧质量趋于最低

值，而同时弹簧的变形与切变模量成反比。因此使用钛只需缠绕数圈即达到钢制螺旋弹簧的效果，缩小了弹簧的占有空间（为弹簧高度的 50%~80%）并减轻约 50% 的质量。

表 4 钛材与弹簧钢在性质上的比较^[7,10]

Table 4 Timetal LCB properties compared to teel

性质	钢	Timetal LCB
许用应力 /N·mm ⁻²	1 000	1 000
切变模量 G/10 ³ N·mm ⁻²	80	43
密度 /g·cm ⁻³	7.82	4.78
相对质量	100	33

2000 年开始，德国大众在其紧凑型轿车 Lupo FSI 的后桥上装备了钛后悬架。目前已用 Timetal LCB (Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al, 一种低成本 β-钛合金) 代替 Ti-6Al-4V。这种钛合金的切变模量甚至比标准的 α-β 钛合金 Ti-6Al-4V 还低，在性能上具有优势，且熔炼合金时使用钼铁合金代替昂贵的钒，降低了合金的成本^[7,10]。

2.4 底盘

钛在底盘中除用作后桥的螺旋弹簧之外，大众从 1998 年开始，将汽车制动器摩擦衬片连接突缘内的密封垫圈由铝改用钛制造。选用 I 级化学纯钛以保证拧紧螺帽实现气密连接时垫圈有足够的变形余地。采用 I 级纯钛的另一个原因是它抗腐蚀。梅赛德斯·奔驰公司 1998 年则在制动器导向销上使用了 II 级化学纯钛，保证了汽车使用年限的延长。还有人推荐用 IV 级化学纯钛（即工业纯钛，美国根据其 ASTM 标准按其氧、氮、氢、碳、硅和铁等杂质含量的多寡分为 I-IV 4 个级别，I 级质量最佳）制造抗蚀、质量轻、热导率低的制动器衬套顶板。

在底盘上使用钛，除减轻质量外，直接导致车在行进中更令人舒适，因为质量轻更易于吸收路面不平坦造成的颠簸。

另外，一些锻造零件如转向节、车轮托架、悬架臂和轮毂等也以用 Ti-6Al-4V 和 Ti-6222 为宜。但钛材的锻造目前仍十分困难。

3 汽车上适用的钛材

钛在汽车上的应用除成本因素外，还因不同零配件的性能要求而需采用不同的钛材，包括化学纯钛、钛合金及钛基复合材料等。据初步推算约有 40 种钛材的组合可提供不同零配件所需要的强度

等性能要求。一般，钛薄板因成形性、可焊性好适用于排气系统；Ti-6Al-4V 适用于制造连杆，因其疲劳强度高和耐温能力适中；制造弹簧必须使用易于拉制成钛丝并冷加工成弹簧的高强度 β-钛合金。目前以既经济又在性能上适宜的 Timetal LCB 合金即 Ti-4.5Fe-6.8Mo-1.5Al 为最理想。排气气门因排气温度高，须适应剧烈的热应变，要求使用 TiB（颗粒）增强的近 α-钛合金（表 5）。排气气门以 TiB 为颗粒增强剂，用粉末冶金技术制造，所得钛基复合材料提高了室温、高温性能，同时还改善了杨氏模量。

除日本使用 TiB 颗粒制造钛基复合材料外，西方更着重使用 TiC 颗粒增强钛材（表 6）^[6]。

表 5 汽车生产使用的各种钛材^[8]

Table 5 Titanium materials for applications in automotive production

钛材	拉伸强度 /Mpa	屈服强度 /Mpa	延伸率 /%	可能应用
I 级化学纯钛	~300	~250	30	排气消音器、密封衬垫
II 级化学纯钛	~450	~380	22	排气系统 连杆、进气 门、轮毂
Ti-6Al-4V	~1 050	~950	10	
Ti-6Al-4Sn-4Zr	—	—	—	排气气门
-1Nb-1Mo-0.2Si*	—	1 150	4	
Ti-4.5Fe-6.8Mo	—	—	—	悬架、气门 簧、螺栓
-1.5Al**	1 290	1 380	10	
Ti-46.8Al-1Cr	—	—	—	气门、涡轮增压 器叶轮、活塞销
-0.2Si(γ-TiAl 铸件)	525	410	~2	

* 粉冶金，用 5% (TiB) 增强，弹性模量 ~150 GPa

** β 合金，牌号为 LCB，即低成本 β 钛合金

表 6 钛基复合材料在汽车上的应用

Table 6 Some applications of titanium-metal-matrix-composite for automotive components

钛基复合材料	应用部位	减重 /%
Ti-15%TiC-MMC	凸轮轴	40
	空心气门	55
Ti-15%TiC	活塞销	30
Ti-15%TiC	曲柄轴	44
Ti-12%TiC	气门挺杆随动器	
Ti-12%TiC		弹簧座圈
Ti-12%TiC	连杆	44
Ti-10%TiC	变速箱零件	≤50
Ti-12%TiC	传动轴	40
Ti-10%TiC	卡钳形制动活塞	—
Ti-5%TiC	轮毂	44

美、日还相继推出了一些新牌号的钛合金以减轻成本上的负担。除已提及的 Timetal LCB 较 Ti-

6Al-4V 成本下降 22% 外, 美国还曾利用残钛生产标称成分为 Ti-6Al-4V 的 RMIRM 合金 (RM 为再循环之意), 并以铁代钒开发了性能好于或等于 Ti-6Al-4V, 成本却低的 Ti-62S (Ti-6Al-2Fe-0.1Si)。

日本曾开发了 DAT-51 (Ti-22V-4Al), SAT-2041CF (Ti-20V-4Al-1Sn) 和 Ti-16V-4Sn-3Nb-3Al 等三种冷变形 β 合金, 但在批量生产适应汽车应用或成本上不及 Timetal LCB 优越。丰田公司为实现气门轻量化推出耐高温钛基复合材料 (Ti-MMC) 是一种以 TiB 颗粒作为增强剂, 以 Ti-6Al-4Sn-4Zr-1Nb-1Mo-0.2Si-0.30 和以 Ti-7Mo-4Fe-2Al-2V (β 合金) 为基质的钛基复合材料, 前者 TiB 为 5%, 后者 TiB 为 20%。用粉末冶金元素掺混法制造。由于在钛粉内使用 Al-25Sn-25Zr-6Nb-6Mo-1.2Si 母合金粉及 TiB₂ 粉作硼源原位形成 TiB 颗粒, 成本明显下降。气门装在发动机上比普通钢气门发动机减重 40%; 气门弹簧减重 16%。最高转数提高到 700 转/分, 高转速下的噪声降低 30%。凸轮轴驱动力矩造成的磨擦减弱 20%, 达到了提高性能、减少燃油损耗的目的。这种新材料在价/性比上推翻了对普通钛合金的印象, 因此, 自 1998 年以来, 丰田已把 50 万只粉冶钛基复合材料投入市场, 取得了在批量生产汽车中应用钛的突破。但成本仍为钢气门的 2 倍^[6~11]。

4 当前汽车中应用钛的规模

日本为拓展钛的民用市场, 1990 年开始在赛

车生产中使用 Ti-3Al-2V (La, Ce)-0.1Si (DAT-52F) 制造连杆, 以提高车速、功率输出并减小发动机噪声。由于该合金的切削能力优异, 当时形成年产 25 000 个钛连杆的规模。1998 年丰田利用成本较低的钛基复合材料, 批量生产了钛气门, 按每个钛基复合材料气门 25 g, 年均生产 100 000 个气门计, 每年仅此一项用钛量为 2.5 t, 5 年共用钛 12.5 t, 装备了 Altezza 轿车共 31 250 辆。此后大众集团在 Lupo FSI 紧凑型轿车上批量应用了钛后悬架。奥地利运动摩托车制造商 KTM 在 Motocross 发动机 LC8 上使用了薄达 0.33 mm 的排气消音器。2001 年美国通用汽车公司在其 Chevrolet Corvette Z06 运动车上开始装备用 II 级化学纯钛制造的全钛排气消音器, 重量仅 11 kg, 而不锈钢消音器重 18.6 kg。形成了日、美、欧汽车产业向应用钛材进军的三足鼎立新局面, 在发动机等重要部位开始了在技术上、经济规模上应用钛的较量。油价攀升的推波助澜, 将彰显 21 世纪钛在汽车制造中蒸蒸日上的地位 (表 7)。

1995 年钛在全球汽车制造业中的用量仅为 100 t, 2002 年钛在全球汽车、卡车、摩托车中的用量为 1 100 t, 尤以日本消费增长最快。日本 1991 年在消音器中的用量为 90 t, 1997 年将钛引入摩托车排放系统, 用量为 20 t, 此后又将 β -钛合金引入弹簧生产, 由于成本下降, 产量大幅度提高, 到 2002 年钛的总用量已经达到 573 t, 占其钛加工产品总量的 4%。

目前钛在全球汽车行业中的用量估计约占其总消费量的 3%, 即大约 1 500 t 左右。有人预计钛在

表 7 钛在汽车零件制造中的用量^[8,9]

Table 7 Use of titanium materials in the automotive component production

年份	元件	材料	制造厂家	车型	年消费/t·a ⁻¹
1992	连杆	Ti-3Al-2V-RE	本田	Acura NSX	25 000 个
1998	制动器导向销	II 级化学纯钛	奔驰	S-型	<8
1998	制动器密封垫圈	I 级化学纯钛	大众	所有车型	<40
1998	变速器球形捏手	I 级化学纯钛	本田	S2000 Roadster	—
1999	连杆	Ti-6Al-4V	Porsche	GT3	<1
1999	气门	Ti-6Al-4V 和粉冶钛基复合材料	丰田	Altezza 6 缸	2.5
1999	涡轮增压器叶轮	Ti-6Al-4V	奔驰	柴油卡车	—
2000	悬架弹簧	Timetal LCB	大众	Lupo FSI	3~4
2000	气门防油罩	β 钛合金	三菱	全 1.8 升 4 缸	—
2000	涡轮增压器叶轮	γ -TiAl	三菱	Lancer	—
2000	排气系统	II 级化学纯钛	通用汽车	Corvette Z06	>150
2002	气门	Ti-6Al-4V	尼桑	Infinity Q45	—
2003	悬架	Timetal LCB	法拉利	360 Stradale	—

家庭轿车中应有的增长, 有可能将其用量提升到 22 500 t 的水平^[12,13]。

5 降低钛材成本的途径

5.1 钛冶金新技术

钛的提取、熔炼、加工十分困难。钛锭的生产成本约为同质量钢锭的 30 倍, 铝锭的 6 倍。目前每吨工业纯钛的成本约为 7 500~10 000 美元。而钛材的生产成本包括电弧熔炼熔铸成锭、热挤压、热锻、热处理和机加工的成本已超过总成本的 60%, 价格甚至高达 40 000 美元/t。因此, 降低成本主要是降低工业纯钛的生产成本及钛材的加工制造成本, 而降低工业纯钛成本是降低钛材的重要环节。

目前生产工业纯钛的方法是用镁还原 $TiCl_4$ 生产海绵钛的克洛尔 (Kroll) 法。这是一种工序多、间歇生产、高耗能 (理论能耗为每吨钛 6 945

kWh)、高成本的生产方法。为降低生产成本, 近年来先后涌现出 14~15 种创新的生产钛的方法 (表 8, 表 9), 其中以 TiO_2 直接电解生产金属钛的 FFC 剑桥法最负盛名。该法由在剑桥大学工作的华人学者 G. Z. Chen 等人研发, 系在熔融 $CaCl_2$ 内直接电解使 TiO_2 脱氧的反向电解法或电解脱氧法。该法原料 TiO_2 和 $CaCl_2$ 成本低、生产周期短、能耗低、所得钛粉纯度高。混入其他相关金属氧化物可直接生产钛合金粉, 生产的钛粉或钛合金粉可通过粉末冶金工艺制造价格合理的近净成形件, 并且能实现连续生产 (表 8)。这些优点已使该法受到广泛关注, 目前英国钛公司已将 FFC 技术转让给美国钛公司, 估计其批量规模从 9 kg 扩大到 22.7 kg, 近期有望进一步扩大到每天 227 kg 的规模。美国钛公司 (Timet) 如取得成功, 将开辟出一条使钛的生产成本下降 50% 以上的途径^[14,15]。

表 8 FFC 剑桥法与 Kroll 法的比较^[15]

Table 8 Comparison between FFC Cambridge and Kroll extraction processes for titanium

	FFC 法	Kroll 法
过程操作时间	24~48 h, 有可能实现连续操作	每批进料需一个星期
纯度	氧杂质可控制在低于 0.006%、氮杂质可控制在低于 0.002% 的水平	典型的氧杂质含量平均为 0.05%~0.07%, 采用特种设备和更长的操作时间可获较低的氧含量
均匀性	各批之内和批批之间高度均匀	氧、氮量因各批进料位置不同而不同, 有形成硬 α 高氮缺陷的可能
合金	可获预合金海绵, 免除了使用昂贵的母合金和掺混步骤, 合金均匀, 细晶粒无宏观偏析	通常不能得到合金海绵

日本京都大学的小野、铃木提出了一个与 FFC 剑桥法在原理上大体相似的 OS 法。OS 法是一种以 $CaCl_2$ 为熔剂, 用溶解在 $CaCl_2$ 的 Ca 还原 TiO_2 制备纯钛的方法, 在还原出钛的同时, 所生成的 CaO 溶解在熔融 $CaCl_2$ 内, 形成 $CaCl_2$ -CaO-Ca 三元系, 通过在同一容器内的同时原位电解, 完成还原剂钙的回收。

对钛冶金而言, 这两种方法的共同之处在于可实现由氯化物冶金向氧化物冶金的转变。而两法的主要区别在于槽内的电子载体不同。FFC 法中只有 O^{2-} 传导电子电荷, 阳极上逸出的唯一气体是氧, 但当电压高于 2 V 时会形成 CO_2 , 且电解不充分时往往出现 $CaTiO_3$ 相。而 OS 法中 Ca^+ 、 Ca^{2+} 和 O^{2-} 均传导电荷, 还原与电解同在一个电解池中进行, 可成功沉积出脱氧充分的粒状海绵钛 (脱氧钛阴极的氧含量极低, 小于 10^{-5})。可见 OS 法亦不失为有可能实现商品化的方法。

但是, 上述两种直接还原 TiO_2 的方法的共同缺点是需要大量的熔融盐, 并且还原过程慢。以 OS 法为例, 如每天生产 1 kg 海绵钛要使用 20 kg 熔融 $CaCl_2$ 。并且两法都基于电化学还原而缺乏扩大规模的灵活性。因此东京大学的冈部等人提出了预成型还原法 (PRP)^[18]。这是一种气相金属热还原法, 大量放热。为使反应为均相反应, 并避免还原剂中杂质 (N, C) 进入钛, 该法将进料预成型, 故能有效地控制钛的纯度和形态, 在扩大规模方面有高度的灵活性, 而且还可少用 $CaCl_2$ (进料预成型件由 TiO_2 粉、 $CaCl_2$ 助熔剂和粘结剂混合后制成)。

PRP 法适于生产均质的细钛粉, 对下一步用粉冶方法生产近净形件具有重要意义, 且较易扩大生产规模, 但预成型体还原后尚需浸出、真空干燥等工序, 涉及废渣处理问题。

钛冶金出现了摆脱氯化物冶金向氧化物冶金

寻求新出路的动向。这不只是因为用 TiO₂ 直接还原以 OS 法为代表的新兴方法还存在巨大的节能优势原节约原料成本，从 Kroll 与 OS 法的理论能耗看，（表 10）。

表 9 降低钛制备成本的新工艺^[13,16]

Table 9 Outline of new cost reduction technologies for titanium

方法/开发公司	方法	产品
阿姆斯特朗法/美国国际钛粉公司	液钠还原 TiCl ₄ 蒸气	钛粉
MER 法/美国 MER 公司	TiO ₂ 由混合卤化物电解质输送至阴极电积	钛粉、钛屑或实心钛块
SRI 法/美国 SRI 国际公司	卤化钛流态床还原	钛粉、钛粒
BHP 法/澳大利亚比利顿 (Billiton)	氧化物电解，中试规模	钛粉
爱达荷钛工艺公司	TiCl ₄ 等离子体氢还原	钛粉
GTT 法/Ginatta, 意大利	熔盐电解质内 TiCl ₄ 蒸气的还原	排放出液态钛或固化为钛块
OS 法/日本京都大学	TiO ₂ 钙热还原，电解还原产物 CaO 回收金属钙	钛粉/海绵钛
米林尼姆法/美国 Millenium	不详	钛粉
MIR 法/德国 MIR 公司	在振荡式反应器内用 I ₂ 还原 TiO ₂	钛粒
CSIR 法/南非	四氯化钛氢还原	海绵钛
魁北克法/里奥廷托魁北克铁钛公司	钛渣电解还原	液态钛
EMR/MSE 法/日本东京大学	电解槽内液钙还原 TiO ₂	高孔隙度钛粉致密块
预成形还原法/日本东京大学	用钙还原 TiO ₂	钛粉致密块
Vartech 法/美国爱达荷	TiCl ₄ 蒸气气相还原	钛粉
美国爱达荷研究基金会	TiCl ₄ 机械化学还原	钛粉

表 10 钛生产过程的理论电能损耗^[19]

Table 10 Theoretical energy consumption in titanium production processes

	Kroll 法	OS 法
电解反应和焓变	MgCl ₂ = Mg + Cl ₂ , ΔH = 598.8 kJ (1 000 K)	CaO + 1/2C = Ca + 1/2CO ₂ , ΔH = 445.1 kJ (1 200 K, 吸热)
还原反应和焓变	TiCl ₄ + 2Mg = Ti + MgCl ₂ , ΔH = -420.0 kJ (1 200 K, 放热)	TiO ₂ + Ca = Ti + CaO ΔH = -343.3 kJ (1 200 K, 放热)
每吨钛理论电耗	6 945 kWh	3 189 kWh
备注	还原电解反应分开进行产生的热全部放弃	还原反应产生的热用于电解过程

此外，美国国际钛粉公司根据亨特 (Hunter) 法钠还原 TiCl₄ 生产海绵钛的原理，并利用核工业钠冷高温反应堆所用的液钠回路工艺，开发了不断

地将 TiCl₄ 蒸气注入回路借以生产钛粉的一步生产高纯钛粉及合金粉的方法。该法过程连续，经济上合算，产品质量好，与粉冶工艺结合，可将最终零件的成本最多能降低 50 %。这种方法就是美刊所推荐的阿姆斯特朗法 (图 1)，其商品化过程的实现指日可待^[4]。

5.2 粉末冶金

提取冶金过程生产的纯钛一般要经过两至三次真空电弧熔炼 (VAR) 或近期开发的电子束冷膛炉熔炼 (EBM) 及等离子体冷膛炉熔炼 (PAM) (后两种冷膛炉熔炼较标准的二次真空电弧熔炼可降低 10 % ~ 20 % 的成本) 获得钛锭，再用塑性变形方法通过锻、轧、挤、拉等工艺生产出板、棒、线、管和锻件。但钛材在加工时变形抗力大、常温塑性低、易加工硬化、易粘 (连) 模 (具) 等特性，须采取多种设备、多道工序进行加工，致使加工成本过高。以生产 25mmTi - 6Al - 4V 薄板为

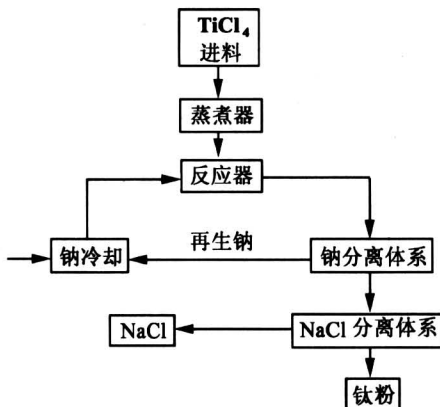


图 1 阿姆斯特朗法流程

Fig.1 Schematic diagram for Armstrong process

例，在总共 26.80 美元/kg 的生产成本中，板材加工成本为 13 美元/kg，占总生产成本的 48%（海绵钛占总成本 38%；一次电弧熔炼占 12%；电弧熔炼占 2%）。

利用钛粉和钛合金粉，通过成型、烧结、热等静压、注射成型（PIM）等固结方法，将粉末加工成制品的粉末冶金工艺，材料利用率高达 80%，可获近终形产品，材料消耗少，切削加工量大幅度降低，是一条行之有效的降低钛零配件生产成本的途径。

钛粉末冶金的首要条件是备有价格合理的优质钛粉。当前已能用包括阿姆斯特朗法在内的多种冶金工艺生产很纯的钛粉（表 11）^[20]。从表 11 各种方法所产钛粉的价格比较看，等离子旋转电极法、等离子雾化法成本最高，气体雾化法和氢化脱氢法

应用最广，其中氢化脱氢法钛粉粒形不规则、有棱角、变形能力强、氧含量可低达 10^{-6} ，氧含量虽偏高（0.20%~0.60%），但在成本上要优越得多，更适合用于低成本的元素混合法生产汽车用粉冶钛制品。如在不氧的氢化脱氢法钛粉内掺入 Al-40V 母合金粉，已生产出全致密的 Ti-6Al-4V 工件，工件的疲劳性能明显改善，达到锻造产品的水平。丰田汽车公司用元素混合法生产的 Altezza 家庭轿车阀门表明钛粉冶零件在成本上已能和普通零件竞争。

同样，阿姆斯特朗法已有可能生产出成本上与生产不够纯净的海绵钛相当的非常纯的钛粉，从而与近终形工艺相结合，使钛零件的成本下降 50% 以上^[14,21]。

表 11 钛粉生产工艺概要^[20]

Table 11 Outline of titanium powder production technologies

方法/开发公司	品种	粒度/ μm	价格/美元·磅 ⁻¹	市场情况	备注
等离子体雾化/Pyrogenesis	多个品种	-45	~180	可购到钛粉	优质（低氧）注射成型，粒度 < 45 μm
		+45	35~75		
等离子体旋转电极法/Starmet 公司	多个品种	平均 150	50~100	此粉年产量约 1 t，但有增产的潜力	随注射成型技术研发的增长，钛粉的销量将增长
			~200 (注射成型)		
气体雾化法(GA)/坩埚研究公司	多个品种	-500	~45 (CP/64)	年产 2~3 t，市场缓慢增长	年生产能力 15 t
		-45	~50 (TiAl)		
铸锭滴下及气体雾化法/住友 SITIX 公司	化学纯钛粉	-45	40~50 (MIM)	每月产 1~3 t，市场不稳定	其前身大阪钛公司低氧钛粉的月产能达 15 t
		-150	20~30		
	Ti-6Al-4V 粉	-250			
	TiAl 粉	-250			
等离子体放电法/MER 公司	化学纯钛粉	1~15	60	研发阶段	根据用户订单生产
		Ti 合金粉			
气体雾化法/Affinity 公司	化学纯钛粉	-230~+43	20~48	可得 O ₂ 、Fe 含量比 ASTM B-265 要求较低的钛粉	是一种无容器方法，年产量 200 t，2001 年生产能力为 1 000 t
		Ti-6Al-4V 粉			
氢化脱氢法/Affinity 公司	化学纯钛粉	-140~+25 的 各种尺寸碎片	8~12	研发阶段	低氧，年生产能力 200 t
氢化脱氢法/Metamorphic 金属公司	化学纯钛粉	-250	20~50	月生产能力为 2t，可得低氧粉和元素混合粉	集中于开发压实/烧结与注射成型工艺的新应用
	Ti-3Al-2.5V 粉	(等离子法)			
	Ti-6Al-4V 粉	-149 (压实/烧结法) -74~-44 (注射成型)			
氢化法/Hyper Industries 公司	Ti-6Al-4V 粉	-200	20~25	可获 Ti-6Al-4V 粉	根据订单生产
氢化脱氢法/ADMA Chips	化学纯钛粉	-45	10	可获样品量	
	Ti-6Al-4V 粉	-45	10	可获样品量	
氢化脱氢法/ADMA Fines	化学纯钛粉	-45	20	可获钛粉	
氢化脱氢法/Reading Alloys	化学纯钛粉	-300~+50	20~50	可获钛粉	最大 2v (O ₂) 为 0.3%，有棱角
	Ti-6Al-4V 粉	-300~+50	20~50	可获钛合金粉	
					最大 2v (O ₂) 为 0.25%，有棱角

5.3 利用残钛和其他

以海绵钛或工业纯钛（经二次真空电弧熔炼海绵钛所得的铸锭）为起点制造最终钛零件的工艺包括熔炼、铸造、粉冶、焊接、塑性加工、机加工等工艺都蕴含着降低成本的空间。

首先在熔炼钛合金时，力求使用便宜的合金添加剂，例如使用便宜的 Mo-Fe 母合金熔炼 Timet LCB (Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al) 不但比高合金化的 Beta-C (Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr) 合金便宜，而且由于 Timet LCB 为冷变形 β -钛合金，塑性好，便于加工成形，是降低成本的可行途径。

海绵钛塑性加工前必须进行真空电弧重熔 (VAR) 浇铸成锭。电弧重熔必须进行二次甚至三次熔炼才能到纯度和显微组织合适的铸锭。目前美国已建立起电子束冷炉膛 (床) 熔炼和等离子体冷炉膛 (床) 熔炼两种作为替代技术的冷炉膛加工法较 VAR 的成本低。这种工艺的特点是可大比例地熔入残钛并除去高密度的夹杂，保证质量和大量再生废钛屑 (残钛)。冷炉膛熔炼还允许应用连续或半连续铸造、单流连铸和采用诸如板坯之类的异形铸造。目前美、欧正计划对单次冷炉膛熔炼的 Ti-6Al-4V 板坯 (用于军用车辆) 进行评估。工业界认为单次冷炉膛熔炼的 Ti-6Al-4V 板坯将比标准的二次真空电弧熔炼节省 10%~20% 的成本。

制造最终钛零件的成品率约 50%~75%，整个工艺过程产生大量的残钛；最终产品如用于航空航天工业，其成品率还要低，每生产 1 kg 钛零件，约产生 10 kg 残钛，因此在民用中使用残钛具有重大意义。为熔铸钛锭，使用海绵钛成本为 6.60~6.90 美元/kg，而用残钛成本只有 1.4~1.8 美元/kg。目前全球钛锭的生产，使用残钛作原料的比例已上升到 50%。美国 2000 年消费了近 3×10^4 t 残钛， 2.5×10^4 t 海绵钛，生产钛锭 4×10^4 t^[14,15]。

通常金属铸件的力学 (机械) 性能低于锻件性能，但钛铸件的使用性能大体上与钛锻件相近，因而其铸造产品成为降低成本、优化工程性能的上佳选择。凝壳炉的应用和熔模精密铸造与金属造型、陶瓷造型工艺的发展，为许多大型复杂的薄壁精密钛铸件缩短生产时间、降低成本展现了一定的空间。尤其是 CAD/CAM 以及过程数模化的应用，明显提高了精密铸造的能力和品质。此外，快速成形 (RP) 技术与 CAD/CAM 相结合、冷坩埚感应

熔炼与离心浇铸相结合都产生了提高铸件质量、降低成本、减少废料的效果。大型薄壁精密铸造技术使钛铸件性能接近钛锻件，而成本降低约 50%^[14]。

6 结论

上世纪 90 年代开始了钛在汽车上应用的技术准备期。钛在汽车轻量化方面所带来的优势和社会效益，使它很快从赛车、高端轿车而扩展到家庭轿车与轻型卡车，在减轻自重、提高性能、节油、环保和美观、舒适方面崭露头角。当前钛在汽车发动机和底盘零件上的应用中已成为首选材料。面对全球年产 $5\,000 \times 10^4$ 辆轿车、卡车的庞大市场，钛的年消费量已上升到 1 500 t 以上的水平，约占全球钛制成品总消费量 3%。为打破钛价过高给应用带来的障碍，一些大公司正在全力开拓降低纯钛、钛材和钛零件成本的新途径。估计 FFC 剑桥法、OS 法、预成型还原 (PRP) 法及阿姆斯特朗法取得技术突破实现批量化商品生产已指日可待。低成本钛生产方法的发展与近终形粉末冶金技术相结合，将是推动钛扩大民用的必由之路。估计在今后 10~15 a 内钛在全球范围内的应用将产生一个以民用 (指不包括航空航天应用) 为主导的划时代的新局面。

我国拥有 10×10^8 t 以上的钛铁矿资源及规模可观的需求市场 (2002 年钛加工产品需求量为 5 500 t)。近年来在需求的推动下，我国的钛工业获得了迅速发展。钛加工材产量已从 2000 年的 2 000 t 急骤增长到 2002 年的 5 500 t，海绵钛产能达 4 000 t/a，为满足国内强劲要求，每年净进口钛材 2 000 余 t，国内总消费量已达 7 300 t 的水平。估计未来几年内我国钛的总产能将达到 16 000 t/a，而国内汽车生产的蓬勃发展及对石油进口的严重依赖，必将为钛在汽车中的应用打开一片新天地^[15,21,22]。

参考文献

- [1] 曹湘洪. 降低油耗减少排放实现我国汽车产业的健康发展[J], 中国工程科学, 2005, 7(1): 1~8
- [2] Powder W F. Automotive materials in the 21st century [J]. Advanced Materials & Processes, 2000, May, 38~41
- [3] Anon. World aluminium scrap shortage [J], Materials Technology, 2003, 18(4): 245

- [4] Hu H, Yu A, Li N, et al. Potential magnesium alloys for high temperature die cast automotive applications: a review [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2003,18(5):687~717
- [5] Crowley G. How to extract low cost titanium [J]. *Advanced Materials & Processes*, 2003, Nov, 25~27
- [6] Froes F H, Friedrich H, Kiese J, et al. Titanium in the family automobile: the cost challenge [J]. *JOM*, 2004, Feb, 40~44
- [7] Peacock D. Titanium springs forward [J], *Materials World*, 1997, 5(10): 580~583
- [8] Leyens C, Peters M. Titanium and Titanium alloys [M], Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003, 385~387, 401~405, 467~481
- [9] Froes F H. How to market titanium: lower the Cost
- [10] 杨遇春,王燕.低成本钛合金与汽车制造[J]. *稀有金属*, 1997,21(9):371~378
- [11] Takashi Saito. The automotive application of discontinuously reinforced TiB-Ti composites [J]. *JOM*, 2004, May, 33~36
- [12] Froes Sam (FH), Tenth world titanium conference [J], *Mat Tech & Adv Perf Mat*, 2004, 19(2):109~114,114~117
- [13] 杨遇春. 钛材降低成本的途径[J]. *宇航材料工艺*, 2004,34(1):26~29
- [14] Ward-Close C M, Godfrey A B. Cost reduction in titanium production and processing [J]. *Materials Science Forum*, 2003, 426~432,4629~4634
- [15] Hargreaves B. Recovering titanium on mission to cut costs[J]. *MBM*, 2004, Apr.28~31
- [16] Suzuki R O, Ono K. OS process-thermochemical approach to reduce titanium oxide in the molten CaCl₂ [A]. *Metallurgical and materials processing: principles and technologies (Vol. III): aqueous and electrochemical processing [M]. (Kongoli F. et al ed.)*. TMS, 2003, 187~197
- [17] Okale T H, Oda T, Mitsuda Y. Titanium powder production by perform reduction process (PRP)[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, 364(2):156~163
- [18] Ono K, Suzuki R O. A new concept for producing Ti sponge: Calciothermic reduction [J], *JOM*, 2002, Feb, 59~61
- [19] "Sam" Froes F H. Sixteenth Annual International Titanium Association Conference and Exhibition [J], *Light Metal Age*, 2001, Feb,82~87
- [20] Ivasishin O M., Anokhin V M., Demidik A N. et al, Cost-effective Blended elemental powder metallurgy of titanium alloys for transportation application [J], *Key engineering materials*, 2000,188,55~62
- [21] 杨遇春. 钛——跨入新千年的金属巨人[J]. *中国工程科学*, 2002,4(3):21~31

Application of Titanium in Automotive Industry and Metallurgical Technologies for Cutting the Cost of Titanium materials

Yang Yuchun

(General Research Institute for Non-ferrous, Beijing 100088, China)

[Abstract] The advantages offered by titanium materials to the automotive industry including reducing vehicle weight, improving fuel economics, protecting environment, lowering noise and optimizing performance, application areas and application tendency are described. Low cost production technologies of sponge titanium and titanium materials are introduced and evaluated.

[Key words] titanium; titanium materials in automotive manufacture; new metallurgical processing of titanium