

钛及钛合金在汽车上的应用

李 中

(宝鸡钛业股份有限公司, 宝鸡 721014)

摘要: 简述钛及钛合金在汽车领域中应用发展情况, 指出随着世界经济的发展, 对环境、能源的要求日益提高, 钛及钛合金作为结构功能性材料, 是汽车实现轻量化, 高性能、高功能化的重要基础。采用该材料是汽车行业实现环保、节能的有效途径。特别是随着钛工业的发展, 钛加工成本的降低, 钛材终将在汽车领域占据重要地位。

关键词: 钛; 钛合金; 汽车轻量化; 高性能化; 高功能化

中图分类号: TG14

文献标志码: A

Applications of titanium and titanium alloys in automotive field

LI Zhong

(Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: An overview of applications of titanium and titanium alloys in automotive fields was introduced. According to the development trend of world economy and requirement of energy and environment, titanium and titanium alloys as structure functional materials were considered as the important foundation to achieve lightweight, high performance and high functionality. It's an effective way to achieve environmental protection and energy saving in automotive industry using these materials. Focusing on the development of the titanium industry and lower cost of titanium processing, titanium will hold an important position in the automotive fields in the future.

Key words: titanium; titanium alloys; automobile lightweight; high performance; high functionality

近年来, 随着汽车工业的发展, 世界汽车产量和保有量迅速增加。2009 年我国汽车产销量超过 1 300 余万辆, 超过美国、日本成为世界汽车产销第一大国。汽车在给人们出行带来方便的同时也产生了油耗、环保和安全三大问题。着眼于长远的可持续发展, 降低燃油消耗和减少排放污染显得尤为迫切。据国际权威部门统计汽车所用燃料约 60% 消耗于汽车质量, 汽车每减轻 10% 的质量, 废气排放量可减少 10%, 可降低油耗 7%。由此可知, 汽车、轻量化是实现上述目标的有效措施。实现汽车轻量化的途径主要有两种: 一是优化汽车框架结构; 二是在汽车制造上采用轻质材料。目前, 汽车上使用的轻合金主要有铝、镁、钛合金等金属^[1-2]。

1 钛合金在汽车上的应用及特点

钛合金是一种新型结构及功能材料, 它具有优异的综合性能, 密度小, 比强度高。钛的密度为 4.51 g/cm³, 介于铝(2.7 g/cm³)和铁(7.6 g/cm³)之间。钛合金的比强度高于铝合金和钢的, 韧性也与钢铁的相当。钛及钛合金抗蚀性能好, 优于不锈钢的, 特别是在具有氯离子侵蚀的海洋大气环境中和微氧化气氛下, 其耐蚀性好。钛合金的工作温度区间较宽, 低温钛合金在-253 °C 还能保持良好的塑性, 而耐热钛合金的工作温度可达 550 °C 左右, 其耐热性明显高于铝合金和镁

合金的，同时，具有良好的加工性和焊接性能^[3-4]。

钛及钛合金优异的性能自钛工业化生产以来就倍受关注，伴随着钛行业的起步，在20世纪50年代中期，钛材进入汽车工业。1956年，美国通用公司研制了“火鸟II”型全钛汽车，“火鸟II”型汽车的表明了汽车行业对钛工业的需求和期望，同时也预示了进入汽车市场是钛工业发展的长远任务和目标。在日本，本田公司在20世纪50年代中期开展了钛材料和钛制零部件的研制工作，在20世纪60年代，赛车发动机上使用了钛制部件。在20世纪80年代，钛制零部件用到车辆批量化生产中。20世纪90年代初，随着世界性能源短缺及人们环保意识的加强，美国、日本和欧洲等国先后颁布了系列生态法规，对燃油利用率，CO₂排放量、汽车质量的减轻、汽车安全性和可靠性等提出了更高的要求。许多发达国家和著名的汽车制造商都积极开发并增加在汽车用钛方面的研究投入。为汽车用钛提供了强大动力。进入新世纪，我国钛工业也逐步进入汽车领域。

在当前汽车市场上，随着豪华汽车、跑车和赛车的需求逐年增加，钛制零部件亦逐年增加。1990年全球汽车用钛仅为50 t/a左右，1997年为500 t/a，2002年为1 100 t/a，2009年为3 000 t/a。由此可见，钛材在汽车行业的应用进入加速阶段。

1.1 汽车中使用的钛制零部件

钛在汽车上的用途主要分为两大类：第一类是用来减少内燃机往复运动件的质量(对作往复运动的内燃机零件来讲，即使减少几克质量都是重要的)；第二类是用来减少汽车总质量。根据设计和材料特性，钛在新一代汽车上主要分布在发动机元件和底盘部件上。钛可制作发动机系统阀门、阀簧、阀簧承座和连杆等部件以及底盘部件中的弹簧、排气系统、半轴和紧固件等。日本和美国在钛应用到汽车方面一直走在前列，使用钛材料的主要部位和部件如图1所示。

1.1.1 钛合金连杆

图2所示为钛制汽车连杆。用钛合金制造连杆能有效减轻发动机质量、提高燃油利用率和减少排气量。与钢制连杆相比，质量可减小15%~20%。意大利的新型法拉利(Ferrari)3.5LV8与Acura的NSX发动机首次使用了钛合金连杆。连杆所用材料主要是Ti-6Al-4V、Ti-10V-2Fe-3Al和Ti-4Al-4Mo-Sn-0.5Si等，其他材料如Ti-4Al-2Si-4Mn和Ti-7M-4Mo等在连杆中的应用也在研制中。

1.1.2 钛合金发动机气门和气门座

用钛合金制作汽车发动机气门，不仅可减重、延

长使用寿命，而且可提高汽车的可靠性和节省燃油。与钢制气门相比，质量减小30%~40%，极限转速提高20%。美国汽车制造商利用钛合金制作进、排气阀较普遍，进气阀使用Ti-6Al-4V合金，排气阀使用Ti-6Al-2Sn-4Zn-2Mo合金。日本汽车制造商制造的烧结气门已供应日本汽车市场。使用的合金为Ti-5Al-2Cr-1Fe、Ti-6Al-4V/TiB、Ti-Al-Sn-Zn-Mn-Nb-Si/TiB和 γ -TiAl。图3所示为 γ -TiAl高性能汽车阀。

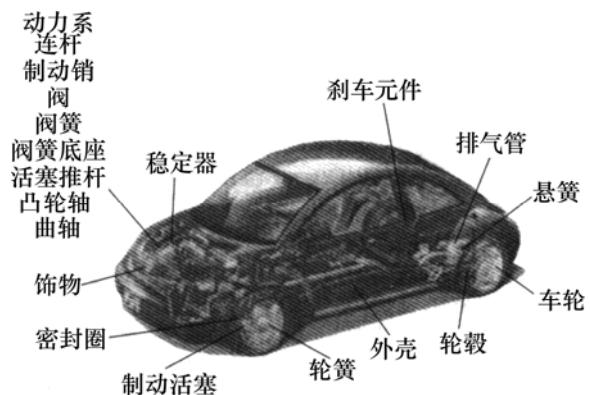


图1 钛材的汽车部件分布图

Fig.1 Profiles of titanium materials in automobile components



图2 钛制汽车连杆照片

Fig.2 Photo of automotive connecting rod by titanium

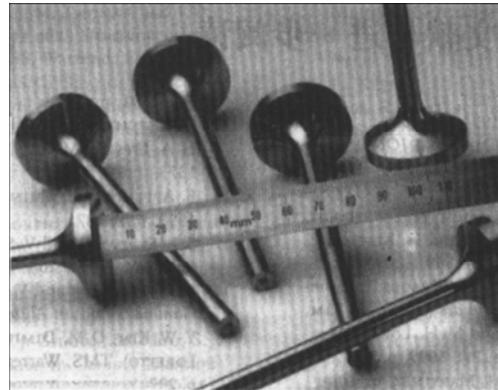


图3 γ -TiAl高性能汽车阀(PLANSEE AG)照片

Fig.3 Photo of γ -TiAl high performance automotive valves

钛制气门座形状简单，易于机械加工，同时，不必进行表面处理，降低了成本。与钢制气门座相比，质量减小 10~12 g。其在赛车上被广泛采用，使用的合金为 Ti-6Al-4V 和 Ti-5Al-2Cr-1Fe。图 3 所示为气门弹簧座照片。

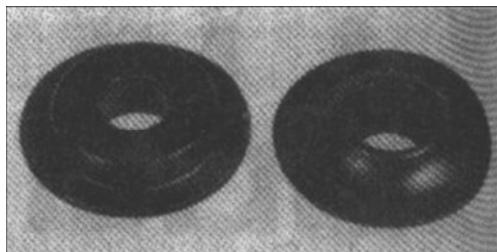


图 4 气门弹簧座照片

Fig.4 Photo of valve-spring retainer

1.1.3 钛合金弹簧

钛及钛合金弹性模量低， σ_s/E 比值大，适合制作弹性元件。与钢制汽车弹簧相比，在相同弹性功的前提下，钛弹簧的高度仅为钢弹簧的 40%，便于车体设计，其质量减小 60%~70%。钛合金优异的疲劳性能和耐蚀性能可提高钛弹簧的使用寿命。1999 年，LupoFSI 尾轴上首次使用了钛制弹簧，如图 5 所示。目前，汽车弹簧用钛合金为 Ti-4.5Fe6.8Mo-1.5Al 和 Ti-13V11C-3Al 等。

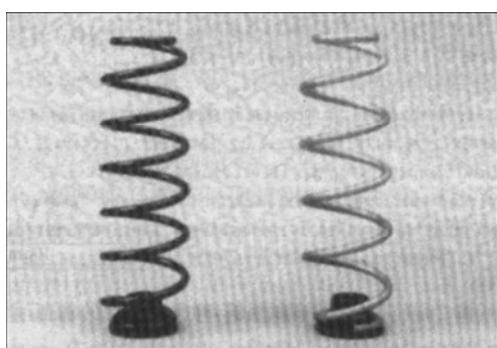


图 5 LupoFSI 尾轴簧照片

Fig.5 Photo of LupoFSI tail shaft spring (left: steel, right: titanium alloys)

1.1.4 排气系统和消音器

钛在排气系统中用量较大，用钛及合金制作的排气系统不仅可以延长使用寿命、提高可靠性和改善外观，还可以提高燃料效率、减小质量，与钢制排气系统相比，钛制排气系统质量可减小约 40%。在 Golf 系列汽车中，钛制排气系统质量可减小 7~9 kg。2001 款 CorvetteZ06 汽车最早采用钛排气系统，如图 6 所

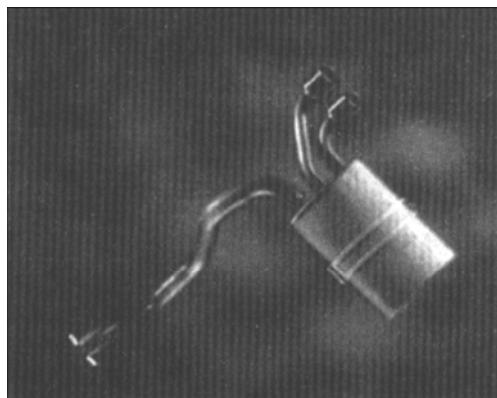


图 6 2001 款 Corvette Z06 汽车钛制双排气系统

Fig.6 Double exhausting system by titanium of 2001 Corvette Z06 car

示为美国 MI Troy ArvinMeritor 有限公司生产的汽车钛制双排气系统。目前，使用的钛材主要为工业纯钛。

钛消音器只有 5~6 kg，比不锈钢等消音器质量小。2000 款雪佛莱 CorvetteZ06 汽车用一个 11.8 kg 的钛消音器和尾气管系统代替原来 20 kg 的不锈钢系统，质量减小 41%。替代后的系统强度不变，并使汽车速度更快、操作更灵活且节约燃料。日本本田等四家公司采用了钛制消音器用于大型汽车和个别中型汽车上。使用的钛材主要为工业纯钛。

1.1.5 车体框架部分

为了提高汽车的安全性和可靠性，需要从设计和制造方面，尤其是材料方面进行考虑。钛不仅具备高的比强度，还具备良好的韧性，是制作车体框架的良好材料。在日本，汽车制造商们采用纯钛焊接管制作框架(见图 7)，这类框架给驾车者足够的安全感。

1.1.6 其他部件

钛除了应用于上述所列部件外，还应用于如下部件：发动机部件的摇臂、悬簧、活塞销、涡轮增压器转子、紧固件、挂耳螺帽、车挡支架、门突入梁、制动器卡钳活塞、销轴栓、离合器园板、压力板和变速按钮。

2 降低钛合金成本的途径

尽管钛及钛合金早在上个世纪 50 年代就进入了汽车制造领域，但发展比较缓慢，其原因主要是价格因素，为了满足汽车行业用钛，钛工业者在熔炼、加工和制造等方面进行了大量的工作，以满足汽车业的需求。

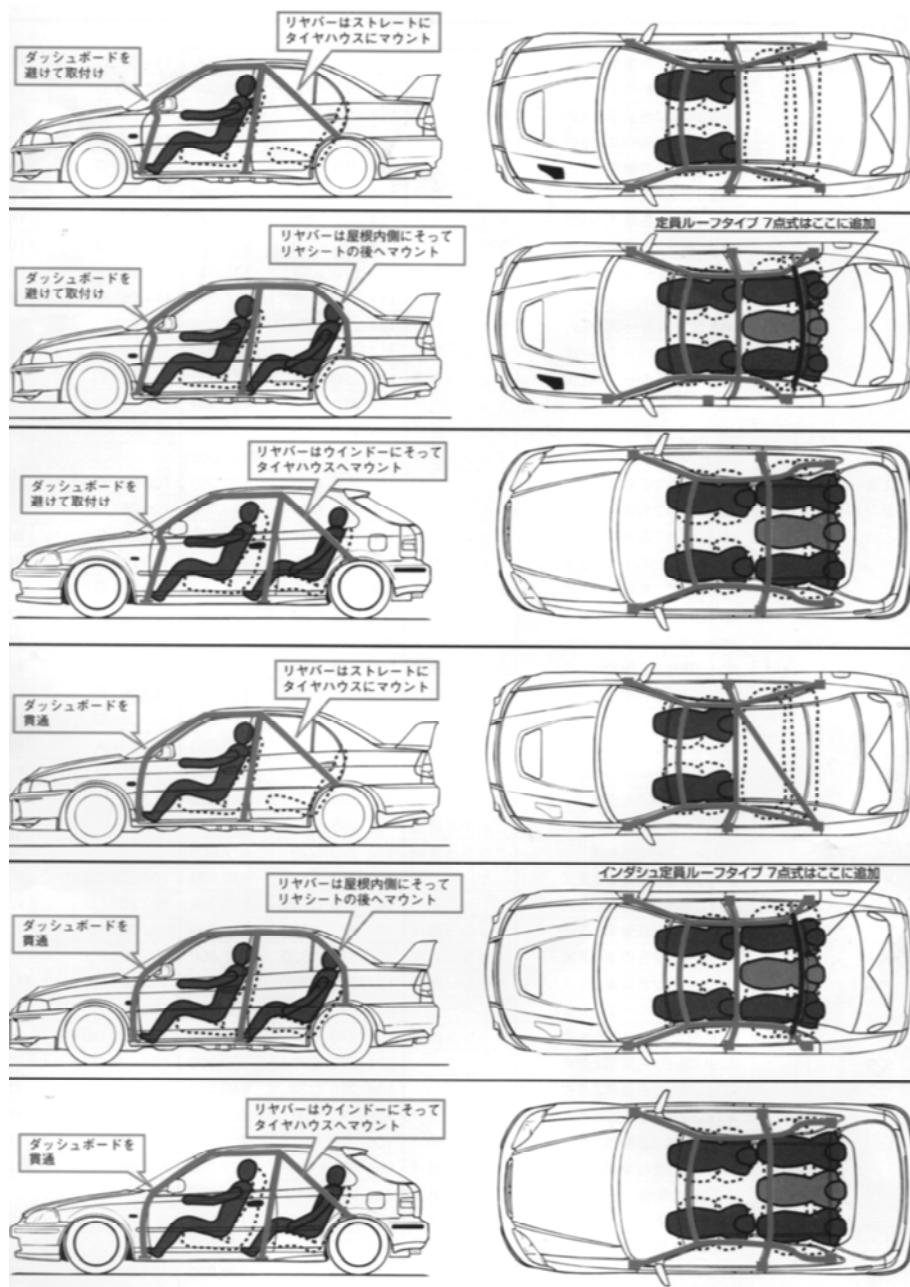


图 7 纯钛管制作的车体框架

Fig.7 Vehicle body frameworks made by pure titanium tube

2.1 降低原材料成本

钛金属熔点高，化学性质十分活泼，与 O, H, N 和 C 等元素有极强的化学亲和力，致使纯钛提取困难。工业上普遍使用 Kroll 镁还原法生产海绵钛。Kroll 镁还原法生产海绵钛工艺复杂、能耗高、周期长，并且不能连续生产，同时，需用大量的金属镁作还原剂，生产成本较高。目前，由英国剑桥大学开发的熔融 CaCl_2 中直接电化学还原 TiO_2 的工艺有所突破，该方法生产海绵钛的生产周期短，且生产成本下降 40%。

钛合金价格高的另一个原因是合金化元素价格较

高，钛合金大多以高价的 V 作为合金元素来提高强度，而这些合金化元素又多以 Al-X 作为中间合金添加。以廉价的 Fe, Cr 等合金元素取代 V 元素，是降低钛合金成本的一种有效方法。美国 Time 公司为取代价格较高的 Ti-1023 而开发的高强钛合金 Ti-1.5Al-6.8Mo-4.5Fe 和汽车用钛合金 Ti-6Al-1.7Fe-0.1Si 均使用了便宜的 Fe 作为合金元素，成本降低 15%~20%。表 1 所列为适用于汽车的低成本钛合金品种。

随着钛冶炼技术的进步，将钛在生产、加工过程中所产生的边角余料、废屑等残料经系列处理后作为

表 1 适用于汽车的低成本钛合金品种

Table 1 Types of low cost titanium alloys in automobile

No.	Composition
1	Ti-6Al-1.7Fe-0.18O-0.1Si
2	Ti-6Al-2.7Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si
3	Ti-4.5Fe-6.8Mo-1.5Al
4	Ti-3Al-2V
5	Yi-6Al-2Fe-0.1Si
6	Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe
7	Ti-4.5Fe-7Mo-1.5Al-1.5V
8	Ti-3Al-2V-0.2S-0.47Ce-0.27La
9	Ti-4.5Al-1Fe-6.8Mo
10	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr

炉料添加, 实现循环生产, 是降低原材料成本有效方法。实践表明, 每利用 1% 的残钛, 可使钛锭生产成本降低 0.8%。如果采用电子束冷床炉、等离子束冷床炉进行熔炼, 不仅可以改善钛锭的冶金质量, 同时可以大量使用回收炉料, 有效降低铸锭成本。

2.2 降低加工成本

占总成本 60%以上的加工成本是研究的重点。钛材零部件在生产制作过程中不仅工艺复杂, 还在制作过程中产生了大量的残钛, 且生产周期较长, 导致部件制作成本高, 阻碍了其更为广泛的推广应用。

铸造是经典的(近)净成型工艺。生产的零部件无需机加工或机加工很少, 从而节约了大量金属。铸造常常能生产出形状复杂的零件, 而这些零件采用其他传统工艺方法制造时工艺复杂, 生产成本较高, 特别是对材料价格相对较高的钛金属。目前, 在航空工业大量应用了钛铸件。在汽车制造业, 用铸造法生产的部件有阀门和涡轮增压器等。

粉末冶金作为一种现代冶金和材料加工的先进技术方法, 在钛工业领域发挥了重要的作用。采用钛粉末冶金近成型技术, 可直接制取成品或接近成品尺寸的零部件, 降低原材料消耗, 缩短加工周期, 成本比常规工艺节省 20%~50%。在汽车制造业, 钛粉末冶金近成型技术尤为重视, 在日本, 汽车粉末冶金零件被广泛用于发动机和变速箱。目前钛粉末冶金的研究正处于飞速发展阶段, 主要包括 2 个方面: 一是高质量低成本钛粉制备技术及其产业化; 二是钛粉末冶金的制备技术及其在汽车工业中的推广应用。

除此之外, 利用激光成型技术(集成了激光技术、CAD/CAM 技术和材料技术的最新成果), 根据计算机模型, 可直接用合金粉末一次成型形状复杂的零件, 制造出的钛零件性能介于铸造和锻造之间, 而成本降低 15%~30%, 交货时间缩短 50%~75%。金属粉末注射成型技术(MIM)是发展较快的一种近(净)成型粉末冶金技术, 可制造高质量、高精度的复杂零件, 被认为是目前最有优势的成型技术之一。钛涂层技术也是一种能降低成本的新型工艺。美国 Allied Signal 公司制造出的本迪克斯牌表面钛涂层汽车刹车片, 已投放市场, 美国两大汽车公司(Ford 和 GM)还研究新型 γ -TiAl 气门, 以用于汽车上。可见, 降低钛材料的价格必须从开发低成本的新的合金系、改进生产工艺两方面入手, 才能解决汽车用钛受钛材价格制约的问题, 使汽车用钛更具有竞争力和发展前景。

3 展望

随着科学技术的飞速发展, 现代汽车制造材料的构成, 发生了较大的变化。低密度材料替代高密度材料是汽车制造业的发展趋势。从上世纪 90 年代开始, 随着环境、能源危机等问题的出现, 汽车材料向轻量化、高性能和高功能方向发展。钛及钛合金作为结构功能性材料, 是汽车实现轻量化、高性能、高功能化的重要基础。目前, 尽管钛材在汽车领域应用不大, 但随着钛工业的发展, 钛加工成本的降低, 钛材终将在汽车领域占据重要地位。2009 年, 我国汽车产销量已达 1 300 余万辆, 若每辆汽车用 1 kg 钛, 钛材用量可达 13 000 多吨。可见, 汽车用钛市场潜力巨大, 前景广阔。

REFERENCES

- [1] LEYENS S, PETERS M. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 等译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 3~9.
- [2] 陈元华, 杨沿平. 轻合金在汽车轻量化中的应用[J]. 桂林航天工业高等专科学校学报, 2008(1): 20~22.
- [3] 张喜燕, 赵永庆. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1~10.
- [4] 肖永清. 诠释现代车用钛合金的应用及前景[J]. 铝加工, 2008(1): 41~43.

(编辑 刘华森)