

钛及钛合金材料经济性及低成本方法论述

李献民, 刘立, 董洁, 赵普

(宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)



李献民

摘要: 钛及钛合金材料因具有密度小、比强度高、韧性好、无磁性、耐腐蚀性好等优异的综合性能, 在航空、航天、舰船、核电等重要领域及石油、冶金、化工、电力、生物医学等民用市场有着广泛的应用。系统阐述了钛及钛合金材料的优越性能及广泛应用, 对比分析了近10年来海绵钛、电解镍、电解铜、不锈钢等原材料价格变化趋势及规律, 分析了实现钛及钛合金低成本化新的加工方式。利用全寿命经济性分析的方法, 对不锈钢、铜合金、镍基合金、钛及钛合金在舰艇冷凝管道应用实例的对比分析及不同材料设备经济综合性分析, 提出了在现有原材料价格、原料产量、加工成本、产品产量的条件下, 应大力推广应用钛及钛合金材料。

关键词: 钛及钛合金; 市场应用; 经济性分析; 全寿命分析; 低成本

中图分类号: TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2015)05-0401-06

Discussion on Economic Analysis and Decreasing Cost Process of Titanium and Titanium Alloys

LI Xianmin, LIU Li, DONG Jie, ZHAO Pu

(Baotai Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: Because of excellent comprehensive properties, such as low density, high specific strength, good toughness, non-magnetic, excellent anti-corrosion, titanium and titanium alloys were widely used in aviation, aerospace, naval vessel petroleum, metallurgy, chemical industry, electric power, biomedicine and other civil markets. This paper describes the advantages and applications of the titanium and titanium alloy materials, comparatively analyzes the changes of the raw materials prices in recent years, such as titanium sponge, electrolytic nickel, copper alloy and stainless steel, and analyzes the processing pathways to achieve low cost of titanium alloy. Through calculating and analyzing the examples of titanium alloys applications by the life-cycle economic analysis method, the economical efficiency was analyzed about condensate water pipings for naval vessels made by stainless steel, copper alloy, nickel alloy, titanium and titanium alloy. Under the recent conditions in raw materials prices, materials production and processing cost, we should vigorously promote the using of titanium and titanium alloy materials.

Key words: titanium and titanium alloy; market application; economic analysis; life-cycle economic analysis; low cost

1 前言

钛及钛合金常被称为“太空金属”、“海洋金属”和“战略金属”, 它具有密度小、比强度高、韧性好、热膨胀系数低、无磁性、耐腐蚀性和耐高温性能好等优点, 是优异的结构和功能材料^[1-4], 已成为航空、航天飞行

器等领域的关键结构材料, 并在舰船、石油、化工、冶金、电力、生物医学等领域获得了越来越多的应用。

与相同领域中使用的不锈钢、铜合金、镍基合金等相比, 长期以来, 人们一直认为钛及钛合金并不具备成本优势, 因此延缓了钛及钛合金材料推广应用的速度及范围^[5-6]。除了钛材价格的影响因素外, 钛及钛合金产量较小, 也成为影响钛材推广使用原因。本文从钛及钛合金原材料价格、原材料产量、加工成本、钛材加工量等方面, 与其他选材进行经济性对比分析, 结果显示钛及钛合金材料具有绝对的应用优势。

收稿日期: 2014-12-15

第一作者: 李献民, 男, 1962年生, 教授级高级工程师, Email: lixianmin@baoti.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2015.05.13

2 钛及钛合金材料经济性分析

2.1 钛合金与其它材料原料价格变化分析

图 1~3 对比分析近 10 年的海绵钛、电解镍、电解铜、316L 不锈钢原材料价格变化趋势。

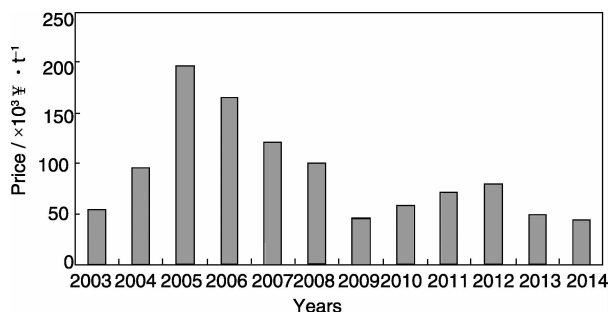


图 1 近 10 年海绵钛价格走势

Fig. 1 Titanium sponge price nearly 10 years

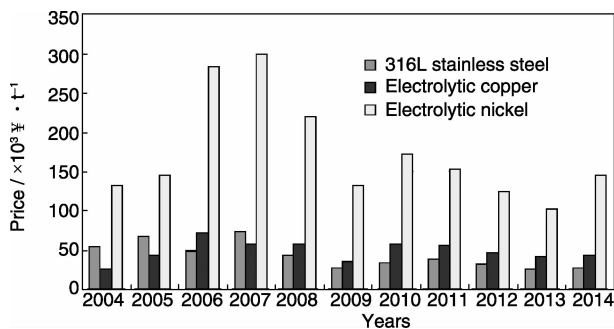


图 2 近 10 年多种金属价格走势

Fig. 2 Some kinds of materials prices nearly 10 years

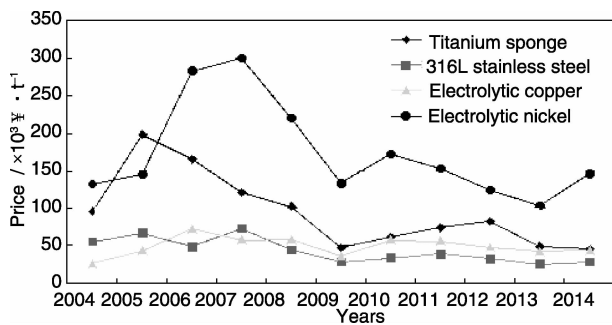


图 3 近 10 年多种金属原材料价格走势

Fig. 3 Some kinds of raw materials prices nearly 10 years

海绵钛价格近 10 年来波动较大, 2005 年海绵钛价位最高时达到 198 000 ¥/t, 之后几年海绵钛价格持续下跌, 2014 年海绵钛价格降至 45 000 ¥/t, 与最高价位相差将近 4 倍, 创历史最低位。

从图 2 中可以看出, 电解镍的价格在近 10 年内波动较大, 2004 年到 2007 年, 电解镍价格从 132 000 ¥/t 上涨至 300 000 ¥/t, 2007 年以后其价格开始下降, 2014 年跌

至 146 000 ¥/t; 电解铜价格从 2004 年至 2006 年持续上涨, 最高价位达到 72 330 ¥/t, 2006 年以后价格持续下降, 2014 年稳定在 43 000 ¥/t 左右; 316L 不锈钢价格从 2005 年 66 800 ¥/t 上涨至 2007 年的 73 100 ¥/t, 2007 年以后价格逐渐下降, 到 2014 年跌至 28 100 ¥/t, 跌去了原价格的 3/5 左右, 跌幅较大。

从图 3 近 10 年的原材料价格趋势可以看出, 目前, 海绵钛价格与电解铜价格相当, 但远远低于电解镍, 而高于不锈钢材料的价格, 但综合分析钛及钛合金在航空、航天等领域的应用, 钛及钛合金的高比强度、耐腐蚀、耐高温等性能优于不锈钢, 在目前的市场情况下, 海绵钛价格优势明显, 这就为扩大钛合金材料的应用提供了保障。

从图 4 的数据可以看出, 2000 年我国海绵钛产量为 1 905 t, 2014 年中国海绵钛实际产量 88 000 t 左右, 14 年间我国海绵钛产量增加了 46 倍, 2014 年我国海绵钛实际产能超过 15 万吨。

从图 5 的数据可以看出, 2001 年, 我国的钛加工材产量为 4 012 t, 2014 年产量达到 49 660 t, 13 年间, 我国钛加工材产量增加了 12 倍; 我国最大的钛材生产单位宝钛集团 2014 年产量达到 18 115 t。

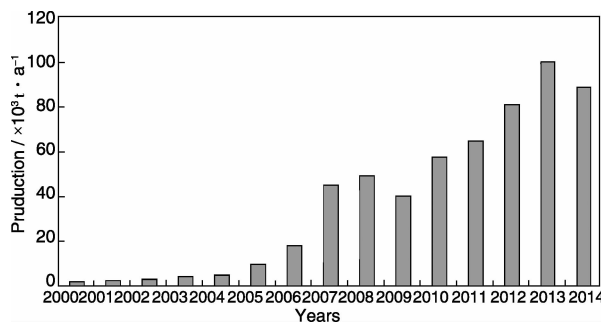


图 4 近年来中国海绵钛产量统计图

Fig. 4 Statistical figure of titanium sponge production in China

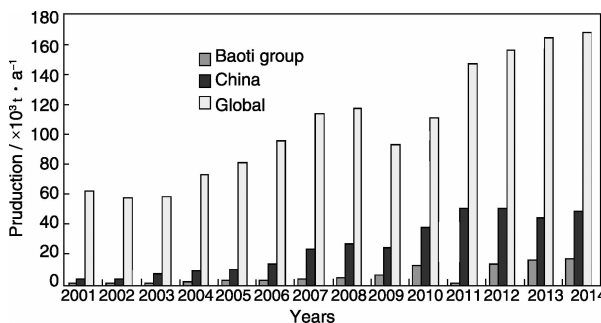


图 5 近年来全球、中国、宝钛集团钛加工材产量统计图

Fig. 5 Statistical figure of titanium material production of the world, China and Baotie group

综上所述,从近15年我国海绵钛产量趋势可以看出,我国海绵钛产量快速提高;同时从全球、我国钛加工材产量的发展趋势来看,钛合金加工材的产量也得到快速的提高,产量的快速提高和原材料价格的不断降低,这都为钛合金材料的扩大应用提供了前提条件。

2.2 钛合金材料应用经济分析

随着钛材冶炼加工技术的快速发展,海绵钛价格和钛材价格已经处于合理的价位,以舰船用钛合金为例,钛合金管道系统与传统材料制造的管道相比应用优势明显。俄罗斯研究了不同材料制造的管道系统,这些材料通常用于容器和船体表面,研究表明,传统材料(碳钢、不锈钢、铜合金)的服役期限大约是2~10 a,服役期内必须进行维修,甚至是更换,特别是在高速推动作用的环境下,各种接头都会产生局部腐蚀缺陷^[7-9]。钛合金只需要一次投入,与舰船同寿命,使用过程只需简单维护。

实际投资时应考虑全寿命的投资而不是只考虑一次性投资,全寿命内总投资包括一次性投资、换装或大修费用和日常维护费用的总和。

实际考虑的因素还包括:使用寿命、停产时间对产品质量的影响。如果将30年作为全寿命周期,考虑换装次数,那么全寿命周期内的总投资,还应包括换装次数与每次换装投资的乘积。

投资成本可以按表示如下公式:

$$Q = Q_1 + nQ_2 + q_c$$

Q —设备服役期内总投资;

Q_1 —设备一次性投资;

n —在寿命年限内的维修次数;

Q_2 —设备每次维修费;

q_c —日常和其他维护费用。

如设备使用 N 年,则转化为年(化)平均投资费用:

$$q = \frac{Q}{N} = q_1 + q_2 + q_c = \frac{Q}{N} + \frac{nQ_2}{N} + q_c$$

q —年平均投资;

q_1 —一次性年平均投资;

q_2 —平均年维修费用;

q_c —日常和其他维护费用。

对表1中列举的管材费用进行全寿命分析比较,同时将表2中的镍基合金 Inconel625 和 316L 不锈钢材质管材替代表1中的 TA2 管材应用进行分析,不考虑冷凝器每年维修费用、泄露换管费用、设备加工费等。

表1 俄罗斯某舰艇舷外侧水冷凝管道系统的比较数据^[8]

Table 1 The comparative data of Russian vessel outboard side water cooling pipe system^[8]

Type	Alloy	
	CuNiFe	TA2
I pipe standard size/m	75 × 2.5	54 × 2
I pipe total weight/kg	146	42
II pipe standard size/m	110 × 5	89 × 2
II pipe total weight/kg	1 768	288
I and II pipe total weight/kg	1 914	330
Single pipe total price/ten thousand yuan	7.656	3.366
Average service time/a	8	30

表2 不同材料设备经济综合性分析^[9]

Table 2 Comprehensive economic analysis of different materials equipments^[9]

Type	Material classification				
	316L	N6	B30	B10	Titanium alloy
$\rho / (\text{g/cm}^3)$	7.8	8.9	8.9	8.9	4.5
Proportion by weight of the same design equipment	1	1.09	1.14	1.14	0.58
Price (t/ten thousand yuan)	2.8	28	14.3	10.08	11
Proportion by price of the same design equipment	1	11	5.8	4.1	2.27
The run-time in the sea/a	2-5	20-30	10-15	8-10	20-30
Life-cycle economic analysis	Low	High	General	General	High

Note: Prices and weight ratio in this table are calculated as basic number in those of 316L stainless steel

按实际运行计算(单根管材),得出以下计算结果

$$Q_{1\text{Cu}} = 7.6 \times 10^4 \text{ ¥}, \quad Q_{1\text{Ti}} = 3.4 \times 10^4 \text{ ¥},$$

$$Q_{1\text{Inconel625}} = 2.81 \times 10^5 \text{ ¥}, \quad Q_{1\text{316L}} = 1.6 \times 10^4 \text{ ¥}$$

$$q_{\text{Cu}} = \frac{\text{One-off investment in tubes}}{\text{Life time}} = \frac{7.656 \times 10^4 \text{ ¥}}{8}$$

$$= 0.957 \times 10^4 \text{ ¥/a}$$

$$q_{\text{Ti}} = \frac{\text{One-off investment in tubes}}{\text{Life time}} = \frac{3.366 \times 10^4 \text{ ¥}}{30}$$

$$= 0.112 \times 10^4 \text{ ¥/a}$$

$$q_{\text{Inconel625}} = \frac{\text{One-off investment in tubes}}{\text{Life time}} = \frac{2.81 \times 10^5 \text{ ¥}}{30}$$

$$= 0.936 \times 10^4 \text{ ¥/a}$$

$$q_{\text{316L}} = \frac{\text{One-off investment in tubes}}{\text{Life time}} = \frac{1.593 \times 10^4 \text{ ¥}}{2}$$

$$= 0.797 \times 10^4 \text{ ¥/a}$$

由计算结果看出, 纯钛 TA2 使用 30 年时仍是一次性投资费用, 钛合金年平均投资为 0.112 万元/年, 铜合金年平均投资为 0.957 万元/年; 同时铜合金管道的平均服役期是 8 年, 而钛合金的平均服役期是 30 年。如果按 30 年计算, 铜合金需要更换接近 4 次, 按上述价格比和计算方法, 全寿命分析后得出铜的投入是钛的 11.39 倍。Inconel625 镍基合金年平均投资为 0.936 万元/年, 316L 不锈钢年平均投资为 0.797 万元/年, 316L 不锈钢的海水运行期只有 2~5 年; 和纯钛 TA2 的使用年限相同镍基合金海水运行期也为 30 年, 但是镍基合金价格昂贵, 并且重量较重。如果按 30 年计算, 则全寿命内考虑钛合金经济性最高。

3 钛及钛合金降低成本方法分析

海绵钛的价格目前每吨 5 万元左右, 已达到历史低位, 甚至已低于成本价格。钛材的价格主要由原料价格(海绵钛、合金)、真空熔炼和加工成本构成。纯钛加工材的价格大约在每吨 10 万元左右, 原料与熔炼加工构成比例大约在 1:1 左右, 对于售价在每吨 15~30 万元的钛合金来说, 比例在 1:1.5~5 或更多。从上述的分析可以看出, 主要可以通过降低原材料制备成本、真空熔炼和

加工成本的手段, 来实现钛及钛合金材料成本的降低。

研发高综合性能、低成本的钛合金, 也成为行业研究的热点。目前主要集中在通过原料制备、合金熔炼技术、加工技术及工艺方面取得突破, 实现低成本钛合金制造。通过海绵钛制备、铸锭制备的优化创新和高效轧制、近净成形制备技术的应用, 钛合金成本最大可以降低 60%, 而且材料性能完全满足实际需要, 海绵钛成本每降低 1 美元, 加工材成本将会降低 10%, 同时, 会使非航空航天市场增加 100%。

3.1 低成本海绵钛制备技术

进入 21 世纪以来, 我国海绵钛产能迅速扩大。2013 年我国海绵钛产能已超过 15 万吨, 海绵钛生产企业通过不断优化工艺, 实现了全流程海绵钛生产, 冶炼综合能耗大幅度降低, 还原蒸馏炉每吨电耗 5 460~6 000 kw·h, 海绵钛每吨电耗已降至 23 000~27 600 kw·h^[10], 达到国际先进水平, 这也为我国海绵钛生产的成本降低打下了基础。

从目前的研究开发现状来看, 采用 TiO₂ 直接电解生产钛的新型熔盐电解法, 替代传统工艺中制备 TiCl₄ 的过程, 目前处于研制阶段, 离工业化生产还有较长的时间。

表 3 国内先进海绵钛生产企业主要经济技术指标

Table 3 The main economic and technical indexes of domestic advanced titanium sponge enterprises

Mg consumption /kg	Reduction distillation furnace power consumption /kW·h	Total energy consumption /kW·h	TiCl ₄ /t	Liquid Cl ₂ /t	Metal yield (by TiCl ₄)
25~46	5 460~6 000	23 000~27 600	4.07	4.5~5.8	97.4

3.2 低成本钛合金铸锭制备技术

3.2.1 低成本钛合金的研制

针对钛合金成本较高的状况, 国外研制了成本相对较低的钛合金。近几年国内低成本钛合金研制也受到了高度重视, 通过合金设计, 添加廉价的合金元素(如 Fe)代替昂贵的合金元素(如 V)等, 开发低成本钛合金, 以扩大钛合金的应用^[11-12]。该方法可行性强, 应用低价合金元素达到降低成本的目的。美国 Timet 开发的以 Fe 作为合金元素的低成本高强钛合金 Ti-1.5Al-6.8Mo-4.5Fe (Timetal LCB) 和汽车用钛 Ti-6Al-1.7Fe-0.1Si (Timetal 62S), Timetal LCB 合金性能与 Ti-1023 相当, 成本仅为 Ti-6Al-4V 的 78%; Timetal 62S 的性能优于 Ti-6Al-4V, 成本可降低 15%~20%^[13]。

国内西北有色金属研究院开发出 Ti12 LC (Ti-Al-Fe-Mo) 和 Ti8 LC (Ti-Al-Fe-Mo) 两种低成本钛合金, 室温性能均优于 Ti-6Al-4V; 洛阳船舶材料研究所也研制出 Ti-0.8Al-1.2Fe 低成本钛合金。目前国内对外对低成本钛合金的研究重点仅局限于采用廉价的 Fe, O, N 等元素代替

昂贵合金元素如 V 等, 综合性能的控制局限于强度和加工性能, 主要应用于汽车、体育等民用领域, 在高端的航空航天等领域没有得到很好地推广。

3.2.2 添加返回残料制备技术

在钛合金的生产过程中, 由于熔炼、锻造、热轧、冷轧、管材挤压过程中会产生一定量的残料, 通过将残料清洗干净, 按牌号分类后, 可以将块料、屑料以捆绑电极的方式用真空自耗电弧炉 (VAR)、电子束冷床炉 (EBCHM)、等离子冷床炉 (PACHM) 熔炼的方式再次返回应用, 残料可回收率最大可达 100%。

钛残料的价格只有海绵钛价格的 20%~30%, 通过添加返回残料的方式, 不但大大降低了部分牌号钛合金的生产成本, 满足市场及客户的需求, 也为残料的二次利用提供了有效途径。国内宝钛集团有限公司应用其 2 400 kw 电子束冷床炉, 添加残料最大比例可达 65%~70%, 实现了材料低成本化制造。

添加返回料制备技术虽然取得了快速的发展, 特别是在民用领域积累了丰富的经验, 但是, 将回收料应用

于重要用途的钛材生产, 还面临较多的问题, 如没有统一回收处理标准和规范, 目前可用于回收的合金牌号不多等。

3.2.3 新型熔炼方式(电子束冷床炉、等离子冷床炉熔炼)

通过缩短制造流程也是低成本钛合金制备的一个有效途径, 目前国际上生产大型优质钛合金坯料使用的方法包括应用新型的电子束冷床炉、等离子冷床炉熔炼技术, 单次冷床炉熔炼直接轧制技术^[14]。

新型熔炼方式可以部分替代真空自耗电弧炉熔炼, 从工艺流程上实现了短流程制造技术, 省去了传统真空自耗电弧炉熔炼的油压机压制电极、真空焊接等工序, 同时还可以大量的回收残料。冷床炉熔炼技术的应用不仅提高了钛及钛合金铸锭的质量, 而且降低了成本, 特别是如果采用单一的冷床炉技术熔炼钛合金, 直接熔铸出扁锭, 加工成本可以节约 10% ~ 20%^[15]。

目前, 我国已建成和在建的电子束冷床炉较多, 等离子冷床炉相对较少。在钛合金熔炼过程中, 电子束冷床炉在合金熔炼时合金元素挥发较难控制; 而在等离子冷床炉熔炼中, 合金元素挥发较易控制, 适合合金的熔炼, 但是氦气是制约其发展的瓶颈, 这些都是需要在生产工艺中亟待解决的问题。

3.3 低成本高效、短流程钛合金轧制技术

在钛合金的生产工艺中, 电子束冷床炉、等离子冷床炉熔炼可以浇铸成扁锭, 可以直接开坯, 省去了锻造开坯的环节, 缩短了流程; 随着带材生产技术的发展, 使得钛薄板和焊管产品的价格直线下降^[15]。如热连轧、冷连轧技术的快速发展, 可以实现钛带的连续快速轧制, 在线的连续退火、酸洗、拉弯矫直, 缩短了钛合金的生产流程, 实现了高效生产, 降低了能耗, 提高了生产效率和产品成材率, 降低了钛合金的生产成本。

高效短流程轧制工艺, 在钢铁企业应用非常成熟, 钛合金企业通过装备升级也可以实现连续化生产, 低成本制造。但是, 钛合金的短流程轧制积累的经验还较少, 需要在生产中继续探索, 不断完善。

3.4 近净成形技术制备低成本钛合金

3.4.1 增材制造(3D 打印)技术

增材制造(3D 打印)技术, 是利用快速原型制造的基本原理, 以金属粉末或丝材为原材料, 通过高能激光束对金属原材料的逐层熔化堆积, 直接由零件的 CAD 模型一步完成全致密、高性能、大型复杂金属零件的“近终成型”制造, 是一种具有变革性意义的数字化、短周期、低成本、先进“近终成型”制造新技术^[16-18]。

增材制造技术作为一种新型的快速制造技术, 有着

广泛的应用前景, 目前在航空、航天等领域部分零部件的制造已经使用到了该技术, 特别是在大型复杂结构件的制造方面, 制造周期短、成材率高、成本低, 成本降低可达到 50%。

目前, 对于增材制造技术研究较多, 但是, 在高性能制粉技术、制造工艺、大型设备的研发、技术标准方面仍存在一些需要解决的问题。

3.4.2 EPS 消失模壳型铸造技术

钛及钛合金精密铸造技术是一种先进的铸件生产方法, 其中钛及钛合金 EPS(Expanded Polystyrene)消失模壳型铸造技术, 会降低钛及钛合金铸件的生产成本, 简化工序, 缩短生产周期。提高铸造精度、尺寸一致性、表面质量, 改善制模的操作环境, 使得铸造模拟更加易于实现, 可以满足市场上对大型、薄壁、复杂、整体钛铸件的铸造要求, 为钛铸件产业提供了更为广阔的市场前景。比如, 大型薄壁精密铸造使钛铸件的性能接近锻件且成本降低约 50%。

EPS 消失模壳型铸造技术作为一种高效的铸造技术, 无论从工艺流程、生产成本、产品质量等方面来看, 都是一种具有很大优势的新型铸造技术, 可以实现低成本制造。但是, 钛合金的消失模壳型铸造目前还存在表面污染层的问题, 仍需要进一步的研究解决。

3.4.3 金属粉末注射成型技术

金属粉末注射成型技术(MIM)是将注射成型工艺和粉末冶金结合的工艺, MIM 作为一种近净成形技术, 可以制造高品质、高精度的复杂零件, 被认为是目前最具优势的成形技术之一^[19]。

利用金属粉末注射成型技术, 可以制造复杂零件; 制品的各部位致密化程度高, 即使是固相烧结, 相对密度可达 95% 以上, 性能可与锻造材料相媲美; 尺寸精度高, 可以最大限度的制得最终形状的零件, 且一般不需要后续的机加工和磨削, 金属的利用率几乎可以达到 100%, 是降低钛合金零部件成本的一个重要途径。

MIM 技术作为粉末冶金新技术, 利用其生产的产品广泛应用于汽车零部件、机械工程零件、摩托车零件的制造, 其产品性能高、生产流程短, 是一种可行的低成本制造技术^[20]。

4 结 论

钛及钛合金的一次性投资已经低于铜合金, 仅是不锈钢的 2 ~ 5 倍; 从全寿命的角度考虑, 其投资成本低于不锈钢、铜合金、镍基合金等金属材料; 随着海绵钛产量和钛合金加工材产量的快速增加, 充裕的产能产量和较低的价格优势, 为钛合金的普及应用提供了强有力的

保障。

通过对海绵钛制备、铸锭制备的优化创新和高效轧制、近净成形等制备技术应用,钛合金成本有了较大幅度的降低,成本可以降低 10%~30%;同时实现了钛合金低成本生产,其材料性同样能完全满足实际需要。所以,在现有的原材料生产、加工产量、制备工艺条件下,钛及钛合金的普及应用已经具备了充足的条件,应大力推广钛合金材料。

参考文献 References

- [1] Wang Hao(王 镐), Zhu Jianwen(祝建雯), He Yu(何瑜), *et al.* 钛在舰船领域的应用现状及展望[J]. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展), 2003(6): 42-44.
- [2] Yang Guanjin(杨冠军), Zhao Yongqing(赵永庆). 钛合金研究、加工与应用的新进展[J]. *Materials Review*(材料导报), 2001, 15(10): 19-21.
- [3] Li Xianjun(李献军), Wang Hao(王 镐), Ma Zhongxian(马忠贤). 钛在舰船领域的应用及前景[J]. *World Nonferrous Metal*(世界有色金属), 2013(8): 24-27
- [4] Sun Y, Zeng W D, Zhao Y Q, *et al.* Modeling Constitutive Relationship of Ti40 Alloy Using Artificial Neural Network[J]. *Materials and Design*, 2011, 32(3): 1 537-1 541.
- [5] Mao Xiaonan(毛小南), Zhao Yongqing(赵永庆), Yang Guanjin(杨冠军). 国外航空发动机用钛合金发展现状[J]. *Rare Metals Letters*(稀有金属快报), 2007, 26(5): 1-7.
- [6] Chang Hui(常 辉), Wang Xiangdong(王向东), Zhou Lian(周 廉). 钛合金及其在舰船装备上的应用现状与趋势[J]. *Materials China*(中国材料进展), 2014, 33(10): 602-604.
- [7] Barbara, Henon K. Orbital Welding of Titanium Pipe for U. S. Navy Ships[J]. *American Welding Society*, 2009, 88: 26-28
- [8] Jiang Chenyu(蒋成禹), Xu Jijin(徐济进), Yan Keng(严 铿), *et al.* 俄罗斯海军用钛情况及我们的思考[J]. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展), 2003(6): 32-34.
- [9] Bai Yunhui(白云辉), Xiang Ping(向 平). 钛合金在舰船武器装备中的应用[J]. *Mechanical Engineer*(机械工程师), 2012(12): 35-36.
- [10] Lu W, Li X Y, Lei Y P, *et al.* Study on the Mechanical Heterogeneity of Electron Beam Welden Thick TC4-DT Joints[J]. *Materials Science and Engineering*, 2012(A540): 135-141.
- [11] Rodney R Boyer, James C Williams. *Developments in Research and Applications in the Titanium Industry in the USA*[C]//Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. Beijing: Science Press, 2011: 10-19
- [12] Zhao Yongqing(赵永庆), Zeng Weidong(曾卫东), Lin Cheng(林 成). 钛合金的定量研究进展[J]. *Materials China*(中国材料进展), 2014, 33(10): 536-539.
- [13] Zhu Zhishou(朱知寿), Shang Guoqiang(尚国强), Wang Xinnan(王新南), *et al.* 低成本高性能钛合金研究进展[J]. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展), 2012(6): 1-4.
- [14] Kosaka Yoji, Fox Stephen P, Faller Kurt, *et al.* Properties and Processing of TIMETAL LCB[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2005, 4(6): 792-798.
- [15] Huang Xu(黄 旭), Li Zhenxi(李臻熙), Huang Hao(黄 浩). 高推重比航空发动机用新型高温钛合金的研究进展[J]. *Materials China*(中国材料进展), 2011, 30(6): 21-26.
- [16] Leyens C, Peters M. *Titanium and Titanium alloys*[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003: 385-387.
- [17] Wang Huaming(王华明), Zhang Shuquan(张述泉), Wang Xiangming(王向明). 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光), 2009, 36(12): 3 205-3 208.
- [18] Yu P, Stephani G, Luo S D, *et al.* Microwave-Assisted Fabrication of Titanium Hollow Spheres With Tailored Shell Structures for Various Potential Applications[J]. *Materials Letters*, 2012, 86: 84-87.
- [19] Wang Huaming(王华明). 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报), 2014, 35(10): 2 690-2 697.
- [20] Lu Bingheng(卢秉恒), Li Dichen(李涤尘). 增材制造(3D打印)技术发展[J]. *Mechanical Building and Automation*(机械制造与自动化), 2013, 42(4): 21-24.

(编辑 盖少飞 王 方)