



钛合金在兵器装备上的应用

陈京生, 孙葆森, 安康

引用本文:

陈京生, 孙葆森, 安康. 钛合金在兵器装备上的应用[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(12): 14–20.

您可能感兴趣的其他文章

1. [国外装甲钢及其标准发展现状](#)

引用本文: 陈京生, 高永亮, 孙葆森, 等. 国外装甲钢及其标准发展现状[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 1–9.

2. [非致命武器装备系统成熟度评估研究综述](#)

引用本文: 吴琼, 汪送. 非致命武器装备系统成熟度评估研究综述[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 10–15.

3. [一种基于K连通的AMC无线监测系统](#)

引用本文: 兰少峰, 陈雯柏, 郝翠, 等. 一种基于K连通的AMC无线监测系统[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 222–227.

4. [基于混沌算法的高端装备指令数据加密方法](#)

引用本文: 霍颖瑜. 基于混沌算法的高端装备指令数据加密方法[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(11): 190–193.

5. [寿命指数分布类型装备可靠性指标估计方法的应用分析](#)

引用本文: 魏国东, 俞翔. 寿命指数分布类型装备可靠性指标估计方法的应用分析[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(12): 63–66.

钛合金在兵器装备上的应用

陈京生¹, 孙葆森², 安康³

(1. 兵器工业标准研究所, 北京 100089; 2. 北方材料与工程研究院宁波所, 浙江 宁波 315103;

3. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

摘要: 钛合金具有高比强、高比模、耐腐蚀、无磁等特点, 越来越受到世界各国国防工业的关注, 几十年来进行了大量的钛合金基础和应用开发以及低成本技术研究, 使钛合金在兵器装备如坦克装甲车辆、火炮等装备上获得应用。高性能钛合金的应用提高了兵器装备的防护性能, 减轻了装备重量, 满足兵器装备对快速部署、高生存力以及特殊环境运输的要求。通过对国外钛合金的研发、低成本技术和在兵器装备上的应用以及标准的分析, 提出我国低成本钛合金在武器装备应用研究以及标准化工作的建议。

关键词: 钛合金; 坦克装甲车辆; 火炮; 精密铸造; 标准; 规范

本文引用格式: 陈京生, 孙葆森, 安康. 钛合金在兵器装备上的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 14-20.

Citation format: CHEN Jingsheng, SUN Baosen, AN Kang. Titanium Alloys for Ordnance Equipment Applications[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 14-20.

中图分类号: TG146.23; TJ811; TJ33; TG249.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-2304(2020)12-0014-07

Titanium Alloys for Ordnance Equipment Applications

CHEN Jingsheng¹, SUN Baosen², AN Kang³

(1. Ordnance Industry Standards Institute, Beijing 100089, China;

2. Ningbo Institute of Northern Research Institute of Materials and Engineering, Ningbo 315103, China;

3. Capital Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing 100076, China)

Abstract: Titanium alloy has the characteristics of high specific strength, high specific modulus, corrosion resistance and non-magnetic, etc., which attracts more and more attention from national defense industry all over the world. In recent decades, a large number of titanium alloy basic research, application development and low-cost technology research have been carried out, so that titanium alloy has been applied in ground weapon platforms such as tanks, armored vehicles, artillery and other equipment. The application of high-performance titanium alloy improves the protection performance of weapon equipment, reduces the weight of equipment, and meets the requirements for rapid deployment, high survivability and special environment transportation of weapon equipment. Based on the review and analysis on the research and development, low-cost technologies, application in weapon equipment and standards for titanium alloys, some suggestions on the application research and standardization of low-cost titanium alloy in weapon equipment in China are put forward.

Key words: titanium alloy; main battle tank; armored vehicle; howitzer; standard; specification

1 钛合金的发展

随着当前武器装备快速全域机动部署作战要求, 对兵器材料轻量化提出了很高要求。主战坦克重量已经达到 70 吨

之多, 步兵战车、火炮的重量也不能适应新形势下的要求。因此轻质合金如钛合金、铝合金和镁合金及其复合材料等受到世界各国材料界和军方的关注, 先后制定了用于武器装备轻质材料的发展规划和计划。美国国防部 2004 年制定了低成本钛材料及其相关制造工艺的集成计划^[1]。

钛合金由于其高比强、高比模、耐腐蚀、无磁等优异性能,特别适合武器装备轻量化和提升性能作为首选的材料。经过低成本钛合金及其先进低成本制造技术的发展,钛合金材料、零部件、分系统及其整个武器装备系统成本大大降低,武器装备全寿期效能较过去大幅提高。在兵器装备如坦克、火炮等方面获得应用。世界部分国家制定了钛合金标准和军用标准,规范了低成本钛合金的制备、零部件生产和在地面武器装备上的应用。

军用陆基武器装备的快速部署和快速反应以及特殊区域的快速运输,对装备的轻量化提出了更高的要求,武器装备必须减重,同时保持和提高生存力。因此钛合金将成为满足这些要求的首选材料,并将在陆基武器装备上的应用越来越广。最成功的应用包括 M1A2 主战坦克、M2 布雷德利战车和轻型 155 mm 火炮 M777。

ATI 公司是钛合金研发和制造的领先单位。生产的钛合金包括:ATI 425[®]-MIL Armor-grade Titanium、ATI 6-4-MIL[™] Armor-grade Titanium、ATI Grade 7、ATI 3-2.5[™] (Grade 9)、ATI Grade 11、ATI Grade 12、ATI Grade 16、ATI Grade 17、ATI Grade 18、ATI 6-4 ELI[™] (Grade 23)。这些钛合金广泛用于包括陆海空国防武器装备^[2]。

ATI 64-MIL 钛合金是两相 $\alpha + \beta$ 钛合金,铝(Al)作为 α 稳定剂,钒(V)作为 β 稳定剂。这种高强度合金可用于深低温至 800 ℉ (427 ℃) 的环境。ATI 64-MIL 合金供货状态包括退火、固溶处理和时效态。可用于:装甲、压缩机叶片、圆盘和喷气发动机环;机身和太空舱部件;压力容器;火箭发动机外壳;直升机旋翼毂、紧固件;要求高强度重量比的关键锻件;医疗和外科设备等^[3]。

ATI 425 合金是一种高强度、高延性钛合金,有多种产品形式,包括冷轧卷材或板材。最初由 ATI 公司开发用于抗弹装甲,最近已被用于航空航天和工业应用。ATI 425 合金是一种 α - β 钛合金,使用铝作为 α 稳定剂,铁和钒作为 β 稳定剂。较低的铝和钒含量以及放宽的氧含量和铁含量使 ATI 425 合金具有延展性和抗拉强度的独特组合。ATI 425 与 ATI 64-MIL 相比,降低了铝和钒含量以及氧含量,从而在提高材料性能的同时降低了材料成本^[4]。ATI425 板材具有良好的抗弹性能,详见表 1^[5]。

表 1 ATI 425[®]钛合金板抗弹性能

材料厚度/英寸	试验弹丸
0.250 ~ 0.614	30 CalAPM2
0.615 ~ 1.574	20 mm FSP
1.575 ~ 1.949	14.5 mm APIB32
1.950 ~ 4.000	20 mm API-TM602

2 钛合金在坦克装甲车辆和火炮上的应用

2.1 坦克装甲车辆

1) 钛合金材料技术研究

坦克装甲车辆由于近年来的作战模式改变,要求其高机动性、特殊环境下的快速部署以及高生存力。因此必须研发新型高比强钛合金以及低成本制造技术,从而使高性能钛合金在坦克装甲车辆上获得应用。

William A. Gooch 等^[6]在综述中给出 M2A2 布雷德利形状非常复杂的车长舱盖,通过使用钛锻件舱盖比钢舱盖重量更轻,抗弹性能与以前的钢舱盖相当。

在 2005—2006 年,ARL 与英国宇航先进材料公司研究了热压净型复合弧度钛防弹插片。板材采用 MIL-DTL-46077G 下的 3 级和 4 级钛合金制成。ARL 还研究了 M113A3 装甲人员输送车用钛披挂装甲,其防弹性能优于较重的钢披挂装甲。

一种类似于双硬度钢的双硬度钛冶金结合层压板利用软硬钛板的力学性能和弹道响应机制来抵御弹丸冲击。较硬的面板用来抗弹,较软的背板用于减少后表面的剥落。将 Ti-3Si-Fe-0.5N 面板合金滚焊到 Ti-7Al-2.5Mo 背板上形成复合板,然后进行热处理。研究发现,当厚度比为 70/30 时,硬度为 Rc 60 或更大的面板对于防弹和最大抗剥落性是最佳的。美国陆军研究实验室 (ARL) 研究了四种结合工艺如轧制、扩散连接、热等静压或爆炸焊接等,发现抗弹性能可以提高 10-25%。热等静压 Ti-6Al-4V/CP Ti 层压板的抗弹性能比单一的 Ti-6Al-4V 等重板的抗弹性能提高约 10%。

英国宇航先进材料公司根据与 ARL 的合同,开发了一种利用钛和钛/二硼化钛 (TiB2) 粉末混合物在热压大型近净形制备 FGM 块的工艺,形成二硼化钛 (TiB2) 硬质表面/钛金属基底,中间层为梯度结构。另一种更先进的是钛基热等静压陶瓷复合材料。弹道冲击试验显示出钨合金穿甲弹弹芯被一种叫做界面停顿的失效机制所破坏。

ARL 资助开发了 P900 钛,使用两种不同的铸造技术来证明生产轻型纯钛铸件的可行性,以及这种铸件对动能穿甲弹的抗弹性能。其目的是研制一种 P900 钛板,满足钢军用规范一般性能要求,但可大大减轻军用平台的重量。这种铸造钛板被凿了一定间距和一定形状的孔。

非 Ti-6Al-4V 合金的开发和应用也提供了很大的优势,因为减少了使用较高成本的合金元素和较低成本的电子束或等离子体束处理。ARL 认为这一技术方向未来会增加钛在地面装备应用,无论是作为独立结构材料还是与其他材料结合使用。ARL 已经研究了许多 4 级钛合金的潜在应用;包括 TIMET 62S 和 ATI 425-MIL。后一种合金显示出与标准 2 级 Ti-6Al-4V 合金相似的弹道性能,但使用铁(Fe)代替一些钒(V)作为 β 稳定剂。该合金还可以冷加工和热加工,这种能力在各种开发应用中显示出较大优势。研究表明,MIL-DTL-46077G 4 级 ATI 425-MIL 钛合金具有大的弯曲能力。

M1A2 艾布拉姆斯坦克通过协同努力减轻了底盘组件的重量,超过 1 500 磅。M2A2 布雷德利战车车长舱盖采用钛合金锻造,顶部防护采用了钛合金。侧面的反应装甲盒使用钛板替代钢板,从而减轻了反应装甲的重量。

目前钛的应用还包括在 Stryker 系列车辆的两个版本。Stryker 移动防护炮系统炮舱由钛制成,斯特赖克 RV 和 FSV 型车上的钛炮手保护套件。BAEPegasus 钛轮式原型车辆结构是早期的未来战斗车辆车体部分,用于测试复合装甲。下车体和前部部分由军用规范 MIL-DTL-46077G 3 级低成本钛制成,并与复合材料和空间框架复合材料上车体制成整个车体。该车辆经过了广泛的弹道测试和冲击载荷。

美国陆军研究评估了用于陆军地面战车的单级熔炼钛^[7]。拉伸力学性能和断裂韧性类似于传统的 Ti-6Al-4V 航空质量板材。电子束冷床炉熔炼 (EBCHM) 钛的抗弹性能类似于 MIL-T-9046。还有大量陆军项目受益于使用一次熔炼低成本钛。美国陆军已成功验证了低成本钛合金在仿型车 Pegasus 上的应用。EBCHM Ti-6Al-4V 板的抗弹性能试验数据见表 2。从表中可以看出, V_{50} 值均高于标准 MIL-DTL-46077F。

表 2 EBCHM Ti-6Al-4V 板的抗弹性能试验数据

厚度	试验弹丸	试验 $V_{50}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	要求的 $V_{50}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) *
25.35	20 mm	1 016	950
26.72		1 023	1 008
38.79		1 493	1 362
38.30	FSP	1 496	1 352
63.96	30 mm	932	889
63.83		941	888

* :来自 MIL-DTL-46077F

减重是选择装甲材料的重要标准。各种新型材料正被研究用于轻型装甲,钛合金因其高比强、耐腐蚀性和良好的弹道性能而成为潜在的候选材料。G. Sukumar 等^[8]研究了热处理对 Ti-4Al-2.3V-1.9Fe 钛合金力学性能和抗弹性能的影响。研究表明,在 $\alpha + \beta$ 区固溶处理并时效 (930 ℃ 和 900 ℃) 的钛板显示出良好的强度和延性。Ti-4Al-2.3V-1.9Fe 板在 $\alpha + \beta$ 固溶处理和时效 (900 ℃ STA) 条件下的冲击性能优于轧制退火的 Ti-4Al-2.3V-1.9Fe 板。与轧制退火和 $\alpha + \beta$ 固溶处理以及时效处理的 Ti-6Al-4V 板相比,900 ℃ STA 钛-4Al-2.3V-1.9Fe 板对 7.62 mm 球形弹丸具有更好的弹道性能。

Ping Song 等^[9]通过实验、模型和验证研究了高速冲击下 Ti-5Al-3V-2Cr-2Fe 的本构行为。利用弹道冲击试验研究了 7 mm 厚 Ti-5322 靶的弹道性能,并通过弹道试验验证了本构模型的准确性。实验结果表明,J-C 本构模型可以很好地预测 Ti-5322 靶的极限侵入速度和破片在侵入过程中的速度衰减。直径为 10 mm 的钨合金球在 0° 和 30° 时对 7 mm 厚的 Ti-5322 靶的弹道极限速度分别为 416.0 m/s 和 484.8 m/s。在相同变形条件下,新型低成本 Ti-5322 钛合金的屈服强度

明显高于钛 Ti6Al4V 合金。在准静态条件下 (0.01 s^{-1}),Ti-5322 钛合金的压缩屈服强度为 1 255 MPa,比 Ti6Al4V 的屈服强度高 20%。在动态条件下 ($600 \sim 2\,000 \text{ s}^{-1}$),Ti-5322 钛合金的屈服强度为 1 430 ~ 1 470 MPa,比 Ti6Al4V 的屈服强度高 28%。

Ahsan Ul Haq 等^[10]综述了不同高吸能材料。蜂窝夹芯板由于其较低的密度和较高的能量吸收能力而被广泛开发。在所有轻合金中,钛装甲抗弹性能突出,但由于其成本高仍然难以实现在地面武器装备的应用。然而,钛 + 铝合金层压板已成为层压装甲的一大成果。C. Broeckhoven 和 A. du Plessis 建立了 Ti-6Al-4V 人体装甲模型,以评估其防护应用的潜力。特别是,他们传达了仿生冲击防护样品可以通过增材制造技术来制造,并且揭示了点阵壳可在屈服过程中表现出高能量吸收能力。

粉末冶金工艺可用来制造结构比较复杂的部件以及制造梯度功能装甲材料。针对不同的威胁对象以及侵略阶段,设计出不同性能梯度的结构装甲,完成对穿甲弹药的防护。

美国 ADAMProductsInc 公司研究了通过低成本固态粉末冶金工艺制备了军用钛合金^[11]。采用低成本创新性钛粉生产技术、降低成本的混粉冶金方法、冷等静压、烧结、轧制、挤压和热处理 (退火 1 350 ℃,4 h) 等工艺制备的 P/MT-6Al-4V 装甲板。该装甲板的室温拉伸性能参数见表 3。氮、氧、氢含量分别为 0.008、0.158 和 0.005 4。

表 3 P/MT-6Al-4V 装甲板的室温拉伸性能参数

P/MT-6Al-4V	抗拉强度/ksi	屈服强度/ksi	伸长率/%	面缩率/%
0.75"	139 ~ 147	126 ~ 136	16 ~ 17	32 ~ 36
0.50"	142 ~ 151	129 ~ 132	15 ~ 18	33 ~ 39

该公司还用这种技术研制了 P/MTi-6Al-4V 车长舱盖,只是其中的轧制换成了锻造,热处理退火 1 300 ℃,2h。氮、氧、氢含量分别为 0.021、0.179 和 0.001 8。舱盖材料的室温拉伸性能 (厚度 1.375") 的抗拉强度、屈服强度、伸长率和面缩率分别为 143.8 ~ 149.3 ksi、132.1 ~ 136.3 ksi、14.0% ~ 15.5% 和 34.1%~37.7%。

Pavlo E. Markovsky 等^[12]研究了混合元素粉末冶金制备的钛基层状结构的力学行为。钛基层状结构由 Ti-6Al-4V 层、用 5% 和 10% (体积) 的 TiB 或 TiC 颗粒增强的 (%) (Ti-64) 合金金属基复合材料组成。与先前报道的用铸造和锻造技术制造的 Ti-64 合金的数据进行了比较。与均匀烧结的 Ti-64 合金相比,合金中 TiB 和 TiC 增强颗粒的存在导致金属基复合材料的强度和延展性显著下降,因为这些颗粒为裂纹和气孔成核提供了额外的位置,并促进了材料的脆化。然而,当金属基复合材料层用于具有 Ti-64 合金层的双层结构时,三点弯曲试验表明,与均匀的 Ti-64 合金和均匀的金属基

复合材料结构相比,弯曲应力显著增加。与单层均匀结构相比,双层结构能够吸收更高的冲击能量,表明层状结构能够更好地满足防弹应用的要求。

Stanley Abkowitz 等^[13]指出,由于粉末冶金钛可实现性能的改善,可生产不同尺寸从几克到数百公斤的近净形部件,从而不断引起工业和军事部门的兴趣,这就需要开发美国材料试验学会(ASTM)规范,为粉末冶金钛产品提供通用标准,以促进粉末冶金钛产品的应用。Dynamet 编制了 ASTM B988-13《粉末冶金钛和钛合金结构部件标准规范》。新标准包括非合金化纯钛(1、2、3 和 4 级)、Ti-6Al-4V(5 级)、Ti-3Al-2.5V(9 级)、Ti-6Al-4V LI(低间隙)和 Ti-6Al-6V-2Sn 的粉末冶金产品。该标准将促进粉末冶金钛广泛的工业、商业和军事应用。

基于生产高质量粉末冶金 Ti-6Al-4V 近净形产品的能力,价格合理的粉末冶金钛的商业机会正在扩大,该产品具有与传统 Ti-6Al-4V 相当的拉伸性能。RTI 国际公司已收购 Dynamet 技术公司,这将加速混合元素粉末技术在商用飞机、医疗、工业和军用钛合金部件中的应用。

钛基材料结合了表面层的高强度和硬度以及基体金属的足够延展性,在各种应用中非常有前途,特别是作为军工装备中的装甲部件。高强度、高硬度和韧性的组合可以通过创建具有不同性能的多层结构来实现。O. M. Ivasishin 等^[14]研究了层状钛基材料的微观结构特征、力学性能和防弹防护性能。使用两种不同的方法来制造这种层状结构。第一种是常规的冶金(铸锭锻造)方法,随后是 Ti-6Al-4V 和 Ti110 合金的表面快速热处理,用于制造在材料厚度方向具有不同力学性能的分级结构。第二种是元素粉末冶金法,用于制造 Ti-6Al-4V 合金层和基于它的复合材料层的组合结构,并用 TiC 或 TiB 颗粒增强。基于以前获得的优化混合元素粉末方法制造两层和三层 Ti-6Al-4V(VT6)合金基实验板,其中表面层是用 TiC 颗粒增强的复合材料。使用相同子弹的弹道测试确立了相同厚度的层状材料具有不可否认的优势。

近年来,3D 打印技术发展迅速,通过 3D 可以打印出用传统工艺无法实现的结构。通过不同材料的蜂窝、点阵等结构可以实现对高速穿甲弹和爆轰波的防护,从而受到装甲防护领域科研人员的重视并已开展项目研究。Ramin Rahmani 等^[15]研究了一种结合选区激光熔化和放电等离子烧结技术制备的轻质 Ti6Al4V-AlSi10Mg 复合材料。采用蜂窝状网格结构(均匀网格或梯度网格结构)来抵抗冲击和穿甲弹侵彻。结果证明了 Ti6Al4V 点阵的体积分数对于抗冲击性的重要性。具有较小单元尺寸和较细支柱直径的结构与具有较大单元尺寸和较粗支柱的结构具有相同的性能。有限元结果表明,具有较高体积分数的均匀点阵结构可以更有效地防止弹丸穿透,而梯度点阵增强了材料抵抗扭转/变形从而提高材料的损伤容限。

2) 钛合金部件焊接技术

美国海军接合中心 NJC 开展了用于减轻战车重量和提高性能的钛合金研究,研究的项目有装甲和结构应用^[16]。作为装甲,钛合金可以均质形式,也可以与其他金属材料或非金属材料复合的方式使用。EWI 制备出钛合金复杂结构焊接件。目的是研究一系列用于制造优质钛结构件的不同焊接工艺。采用混合制造工艺制造了 1/4 和 1/2 英寸厚的钛结构件。制造该结构件的目的是证明用于下一代陆地车辆的新型不同接合工艺的成熟度。与 ARDEC 的仿型制造小组一起,EWI 完成了用于 ARDEC STO ON-MT 的钛合金后车长盖的制造。ARDEC STO ON-MT 计划是陆军未来战斗系统的先进技术演示验证。车长舱盖用平板和曲面板通过 HLAW 和 GMAW 焊接工艺制造。针对目前的钢结构设计,用钛合金制造该结构件的主要目的是减轻重量和改进性能。EWI 正在使用便携式 CMM 系统进行焊件变形的精确测量,以确保像后车长盖这样部件的制造精度。

机器人脉冲-GMAW 混合激光焊和搅拌摩擦焊工艺被用于制造该结构件,该工艺满足焊接质量和尺寸精度要求。钛合金正在成为除航空、航天和医疗以外工业应用很具吸引力的材料。美国海军和陆军已经开展钛合金及其新型焊接工艺研究,以满足相应武器平台的性能挑战要求和成本可承受性。

2.2 火炮

火炮是陆军对敌方实施远程精确打击压制的主要装备,它在作战过程中发具有重要的作用。在未来战争中,火炮仍将是陆军的主战装备。随着先进材料如钛合金、铝合金及其零部件制造技术的迅速发展,未来的火炮在精度、射程、威力和机动性方面都将有显著的提高。美国超轻型火炮 M777 就是使用钛合金、铝合金并提高该火炮性能的典型案例。

超轻型野战火炮(UFH)M777 于 1997 年由美国陆军和海军陆战队提出,旨在替代 M198 155 mm 牵引火炮。M777 首次大量采用轻合金,通过革新设计,采用先进的制造工艺,使重量从 M198 的 16 000 磅降至目前小于 9 000 磅,大约是现役 M198 重量的一半,因而使其易于高速运输、牵引^[17]。

1) 大量采用钛合金

与 M198 相比,M777 大量采用钛合金、钛铸件和铝合金,实现减重 3 175 kg(7 000 磅)实现减重 44%。钛合金由 RTI 国际金属公司提供。M777 重 3 745 kg,可由直升机、运输机和舰船运输。该牵引炮可由大于 2.5t 的 4◇4 车辆牵引。M777 榴弹炮采用新的设计进行升级换代。在 M777 基础上配备了数字火控系统后命名为 M777A1,通过软件升级以及可以使用神剑弹药后被命名为 M777A2。

M777 超轻型火炮的低成本和轻量化得益于大量采用钛合金和铝合金及其零部件的制造技术。单靠钛合金的低成本是不能实现这些目标的。

2) 采用先进制造技术

① NCMT 制造出世界最大的流动成形钛合金摇架管和反后坐力管

流动成形(FlowForming)属于冷成型工艺,可制出尺寸非常精确的空心圆筒。流动成形钛合金部件可以达到近净形,减少了合金部件的制造废料。该工艺精度高,可被广泛应用于航天和军工领域。NCEMT研究的摇架管生产工艺,与目前的挤压和机加工工艺相比,降低成本,减少废料。NCEMT通过利用新型工艺“流动成形”生产摇架管。麻省 Billerica 市的动力机械厂(DMW)一直在研究摇架管的流动成形工艺。现已生产出最大的流动成形钛合金管,直径 5.6 英寸,长度 72 英寸(约 1.8 m)^[18]。

通过流动成形,厚尺寸的 Ti-6Al-4V 合金管被绕旋转心轴和旋转轧辊挤压变形,最终获得理想的尺寸。由于原材料在挤压过程中几乎 100% 的保持。在 2004 年,NCEMT 向联合项目管理局提供了 45 英尺的摇架管件。该工艺在 LW155 火炮技术演示验证上获得了应用。流动成形工艺应用和降低成本的成功案例是 M777 轻型 155 mm 火炮钛合金摇架和反后坐管。流动成形摇架管成本比原始生产工艺节约 68%^[19]。

② 精密铸造——减少部件数量

许多军用武器的多部件数量导致了高的制造成本。由许多独立部件组成的复杂零件还会使制造周期增长。美国军方一直在致力于降低成本,同时提供更大的效益。美国国防部(DOD)采取革新的工艺实现了这些目标。精密铸造是减少部件数量最有效的工艺方法之一^[20]。

精密铸造工艺具有以下优点:降低制造成本;减少制造周期;提高可靠性;减轻重量。精密铸造可应用于许多军用领域,如军械、飞机机身、弹丸和推进装置等。与传统工艺对比,通过使用钛合金和精密铸造工艺。M777 轻型火炮部件数量大为减少。美国海军金属加工中心采用精密铸造工艺使 M777 轻型 155 mm 火炮驻锄的部件数量,从 120 减至 2,详见表 4^[21]。

表 4 通过精密铸造工艺 M777 轻型火炮部件数量
与传统工艺部件数量对比

钛结构件	传统制备法	精密铸造法	部件数减少/%
摇架	324	172	48
架体	215	11	95
马鞍型支架	116	5	96
稳定装置	70	2	97
驻锄	120	2	98
炮尾	98	2	98
升降坐盘	19	1	95
驻退机	11	1	91
总计	973	196	80

美国国家先进金属加工中心(NCEMT)开展了研究新型

制造工艺和革新成型技术,以减少部件数量和降低材料废料和制造成本。与轻型火炮联合管理局(JPMO)、BAE 和钛合金工厂一起,研究用于 M777 轻型 155 mm 火炮(LW155)的单件精密铸造驻锄(spade)。过去是采用机加和焊接来制造驻锄。另一个具有挑战性的部件是转向架(saddle),原来采用将 100 多个零件加工焊接在一起而成。NCEMT 和 JPMO、BAE 以及钛合金工厂共同研制出单片精密铸造转向机^[22]。

另外采用锻造工艺制造,与采用轧制板机加工工艺相比减少废料 50%。已经成功用低成本单熔体等离子弧熔化(SM PAM)Ti-6Al-4V 坯料锻造出低成本钟形外壳。该钟形外壳锻件抗拉强度为 965 MPa ~ 1,034 MPa;屈服强度为 910 ~ 972 MPa;伸长率 14.9% ~ 5.9%;断面收缩率 36.2% ~ 40.9%。所有 SM PAM 锻件的拉伸性能都满足 AMS 4928 和 ASTM B 381 标准的要求^[23]。

③ 爱迪生焊接研究所(EWI)研究用于制造 M777 轻型火炮的焊接工艺

美国陆军正在研究轻质材料,如铝合金、钛合金和复合材料在先进结构件上的应用,以降低武器装备平台的重量。另外用这些材料制造混合结构部件,需要大量的接合工艺,其中包括搅拌摩擦焊、混合激光电弧焊(HLAW)、脉冲气体金属弧焊(GMAW)等。M777 稳定器梁臂是用 Ti-6Al-4V 合金板和铸件通过气体钨电弧焊(GTW)工艺焊接而成。EWI 工作的主要目标是整合高效材料接合技术,以制备复杂的 Ti-6Al-4V 结构件。80 ~ 85% 的 GTA 焊接被 GMAW-P 或激光桩焊所取代。EWI 还支持 ARDEC 的联合项目管理局(JPMO)和 BAE 系统公司开展项目研究。目的是在 M777 火炮武器系统演示验证中采用先进的钛合金焊接技术^[24]。

④ 低成本钛合金单级熔炼工艺

钛合金(Ti-6Al-4V)是轻型 155 mm 火炮的关键材料。NCEMT 成功进行了 31 英寸 PAM 钛合金锭的试生产。该技术已转让给工业部门,并通过主要承包商、BAE 系统公司和 LW155 联合项目管理局(JPMO)首次用于 LW155 火炮。单级熔体 PAM 使 LW155 火炮所用 Ti-6Al-4V 锭的采购成本降低最大 27%。该低成本技术还将受益于其他使用钛合金部件的 DOD 武器系统,如美国海军陆战队远程战斗车辆(EFV)。NCEMT 单级熔体 PAM 工艺使钛锭达到高表面质量,即使是最大直径 31 英寸的钛锭表面质量也很优秀,从而减少或不需锻造前的表面处理。

3 军用钛合金标准与规范

在研究地面装备用钛合金的过程中,世界许多国为规范和推动钛合金的应用,相继制定了不同钛合金的标准和行业规范,如 MIL-DTL-46077G、ATI 64-MIL、ATI 425 等。

3.1 美国钛合金标准

美国钛及钛合金标准有 4 类:美国试验与材料协会标准(ASTM)约 20 项,基本为 1995—2005 年编制;美国机械工程

师协会标准(ASME)1项、美国宇航材料技术标准(AMS)约25项,基本为2001—2003年编制;和美国军用标准(MIL)约9项。其中军用标准包括MIL-T-9047-2005《钛及钛合金棒材和锻坯》,MIL-F-83142-2000《钛及钛合金锻件(优质级)》,MIL-T-46077《钛合金可焊的装甲厚板》,MIL-T-9047-2005《钛及钛合金棒材和锻坯》,MIL-T-81200(MIL-H-81200B)《钛及钛合金热处理》。

美国陆军编制MIL-DTL-46077G,目的是为了促进钛工业开发非航空航天级抗弹钛合金。它规定了4级:1级为Ti-6Al-4V ELI;2级为Ti-6Al-4V标准5级;3级为允许更高水平的氧含量;4级取消了铝和钒的要求。4级钛仍然属于合金的 α - β 范围,并满足军用规范规定的其他力学性能和弹道要求。4级钛合金将拓宽钛合金的弹道应用潜力。军用钛合金MIL-DTL-46077G规范关于钛合金级别和氧含量的规定见表5^[25]。

表5 MIL-DTL-46077G 钛合金装甲规范

级别	化学成分	最大 O ₂ 含量	说明
1	Ti-6Al-4V	0.14%	ELI-10% 最小伸长率 10%
2	Ti-6Al-4V	0.20%	普通装甲-最小伸长率 6%
3	Ti-6Al-4V	0.30%	高废屑含量焊接件和低温问题
4	没有限制	0.30%	未来发展

3.2 国内钛合金标准

我国从Ti-6Al-4V合金标准颁布后,先后又修订和颁布了约30项钛合金国家标准、17项国家军用标准,主要为航空航天材料和部件规范。2010年12月1日颁布《钛及钛合金锻件(GB/T 25137—2010)》等同ASTM B 381—2006a。

2019年,最新颁布了12项钛标准。具体如下:GJB 2220A—2018《航空发动机用钛合金饼、环坯规范》;GJB 9584—2018《钛钕合金丝材规范》;GJB 9583—2018《航天液体火箭发动机用低温钛合金管材规范》;GJB 9581—2018《钛及钛合金焊丝规范》;GJB 9579—2018《舰船用钛及钛合金无缝管材规范》;GJB 9577—2018《增材制造用钛及钛合金粉末规范》;GJB 9575—2018《航天用高温钛合金棒材规范》;GJB 9574—2018《舰船用钛及钛合金铸件规范》;GJB 9571—2018《舰船用钛及钛合金棒材规范》;GJB 9567—2018《叶片用TA11和TC6钛合金棒材规范》;GJB 944A—2018《舰船用钛及钛合金板材规范》;GJB 943A—2018《舰船用钛合金锻件规范》。以上标准实施日期均为2019年3月1日^[26]。

从以上颁布的标准看出,兵器系统还未制定兵器装备用钛及钛合金的军用技术规范,目前只采用国家标准。

3.3 国内外钛合金标准对比分析

从中国和美国关于钛及钛合金标准颁布情况看,我国钛及钛合金的标准化工作与国外先进水平存在一定差距。兵

器系统在钛合金标准化工作方面与国内航空、航天和舰船等系统存在较大差距,与国外钛合金研制与应用以及标准化差距更大。这与兵器装备的特点和钛合金应用水平有很大关系,目前兵器装备应用的钛合金只有1种——TC6(GB/T 3620.1—1994《钛及钛合金牌号和化学成分》和GB/T2965—1996《GB/T 2965—1996 钛及钛合金棒材》)。全钛轻型喷火器已批量生产,正式装备部队,所用材料为工业纯钛、T-3Al-2.5V和Ti-451合金。我国在20世纪70年代开展了钛制空降迫击炮研制。100 mm迫击炮的地板采用TA7合金整体冲压而成,钛底板比钢底板轻10 kg。随后,又研制了82 mm全钛空降迫击炮,与钢制82 mm迫击炮相比,减重16.6 kg。钛合金在兵器上应用极少。

4 结束语

针对未来地面武器装备的快速发展,有些甚至是颠覆人们认知的发展,地面平台将向着全域机动、高打击能力、高生存能力、智能化、网络化的方向发展。轻质材料如钛合金及其复合材料以及先进制造技术将快速发展和应用。因此必须制定好钛合金在地面武器平台应用的发展战略规划,使钛合金在兵器装备上获得较大范围的应用,提高我国武器装备的性能。

4.1 军用钛合金发展建议

美国、俄罗斯、乌克兰等国家在低成本钛合金和先进制造技术的研发已经取得重大突破并在坦克装甲车辆和火炮上获得应用。钛合金低成本技术,特别是美国已进行了系统研究,因而使钛合金在超轻型火炮上获得应用,M777是最典型的示例。总体看来,国外钛合金的应用与其他材料相比较仍然有差距,在坦克装甲车辆上的应用还不是很广,大型结构件还没有应用钛合金。这就说明钛合金的性能、工艺和成本问题仍然是制约其应用的障碍,所以世界各国仍然在投入人力和物力开展钛合金及其低成本技术的研究。美国于2019年开展了M777 ER(增程)火炮研制。增程火炮将采用更长(55倍口径)的炮管、新的摇架^[27]。

建议国家和有关部委组织全国钛合金的产学研力量,在已有的基础上,继续开展钛合金材料技术、钛合金零部件的先进制造技术如海绵钛、钛合金熔炼、轧制锻造、焊接、精密铸造、粉末冶金、3D打印、热处理等低成本技术的系统研究,使钛合金及其部件整个制造链的各个环节都低成本,真正实现钛合金的低成本。

关于钛合金低成本,作者认为还要从武器装备全寿期来考虑钛合金的应用成本。我们不仅仅要看材料和部件的成本,而且还要研究使用钛合金后为武器装备带来的性能提高,如机动性的提高、防护力的提高、特征信号降低、燃油消耗降低、后勤维护减少、武器装备打击精度提高、特殊环境下的运输能力等等。这些优势使装备在战略和战术上所获得的效益远远超过使用钛合金带来的成本增加。因此任何一种新材料应用不能只看其材料和部件本身的成本!

4.2 军用钛合金标准发展建议

加强兵器系统钛合金、部件测试标准化工作,统筹兼顾,做好规划,建立起钛合金材料标准化研究队伍和研究体系,不断开展新型钛合金材料以及零部件制造技术标准研究,从而建立起兵器装备钛合金材料标准体系,缩小差距,赶超国内外先进水平。

参考文献:

- [1] An Integrated Plan for the Development and Processing of Low-Cost Titanium Materials and Associated Manufacturing Processes, 2004.
- [2] <https://www.atimetals.com/markets/defense/Pages/default.aspx>.
- [3] ATI 64-MIL™, Allegheny Technologies Incorporated, www.atimetals.com.
- [4] ATI 425® Alloy, (Grade 38), Allegheny Technologies Incorporated, www.atimetals.com.
- [5] BRYAN D J, MANTIONE J V, MCDEVITT E T, et al. Bayha ATI 425® Alloy for Aerospace and Defence Applications, Titanium 2010, October 3-6, 2010-Orlando, FL.
- [6] The Design and Application of Titanium Alloys to U. S. Army Platforms -2010, TITANIUM 2010, International Titanium Association, 3-6 October 2010, Kissimmee, FL, William A. Gooch, U. S. Army Research Laboratory, Weapons and Materials Research Directorate, Aberdeen Proving Ground, Maryland 21005-5066, USA.
- [7] BrijRoopchand (U. S. Army Tank Automotive and Armament Research, Development, & Engineering Center), Ballistic properties of single-melt titanium Ti-6Al-4V alloy, 22nd Annual ITA Conference, October 1-3, 2006.
- [8] Effect of heat treatment on mechanical properties and ballistic performance of Ti-4Al-2.3V-1.9Fe alloy, Materials Today: Proceedings 2 (2015) 1102 – 1108, 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.015.
- [9] The constitutive behavior of Ti-5Al-3V-2Cr-2Fe under high-velocity impact: Experimental, modeling, and validation, Journal of Alloys and Compounds 811 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151946>.
- [10] A brief review on various high energy absorbing materials, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.648>.
- [11] George I. Abakumov, Vlad A. Duz, V. S. Moxson (ADMA-Products Inc.), Titanium alloys manufactured by low cost solid state powder metalurgy Processes for military, aerospace and other critical applications, Titanium 2010, October 3-6, 2010, Orlando, FL.
- [12] Mechanical Behavior of Titanium-Based Layered Structures Fabricated Using Blended Elemental Powder Metallurgy, Journal of Materials Engineering and Performance (JME-PEG) <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04263-0>.
- [13] Titanium alloy components manufacture from blended elemental powder and the qualification process, Titanium Powder Metallurgy (book). <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-800054-0.00017-4>, 2015.
- [14] Microstructure and Properties of titanium-based Materials Promising for antiballistic Protection, Prog. Phys. Met., 2019, Vol. 20, No. 2, <https://doi.org/10.15407/ufm.20.02.285>.
- [15] Lightweight 3D printed Ti6Al4V-AlSi10Mg hybrid composite for impact resistance and armor piercing shielding, J Mater Res Technol., 2020; 9(6): 13842 – 13854.
- [16] IAN D. Harris, Ph. D (Technology Leader, Arc Welding Technical Director, AMC) Advances in arc and hybrid welding, and AM of titanium alloys, ITA Conference 2010, Orlando.
- [17] M777 155mm howitzer, www.baesystems.com.
- [18] Flowformed tubulars made of titanium alloys, Mathew Fonte, September 2006, https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/2005_2009_papers/Fonte2006.pdf.
- [19] DANIEL L. Winterscheidt (NCEMT Program Director), NCEMT produces the world's largest flowformed Ti-6Al-4V cradle tube for lightweight howitzer. Tel: 814-269-6840.
- [20] Metallic Materials & Processes Enabling Lightweight System Initiatives (Alcoa-Howmet 公司) NDIA GARM Symposium April 27, 2005.
- [21] WILLIAM A. Gooch Jr. (WA Gooch Consulting Inc.), Potential applications of titanium alloys in armors systems, TITANIUM 2011, San Diego, CA, 2-5 October 2011.
- [22] DANIEL L. Winterscheidt (NCEMT Program Director, Tel 814-269-6840) NCEMT manufacturing approaches reduce M777 howitzer parts, weight, cost and waste.
- [23] KEVIN L. Klug, The near-net-shape manufacturing of affordable titanium components for the M777 lightweight howitzer, JOM, 2004, 56: 35 – 41.
- [24] Suhas Vaze, EWI Develops Procedures for Fabricating Lightweight M777 Howitzer, <http://www.ewi.org>.
- [25] William Gooch (WA Gooch Consulting Inc.), The Design and Application of Titanium Alloys to U. S. Army Platforms, International Titanium Association Titanium, 2010.
- [26] 2019 钛及钛合金最新国家军用标准, <http://www.kehui-ti.com/html/news/20191011917.html>.
- [27] Anniston Army Depot Public Affairs, ANAD part of prototype testing, https://www.army.mil/article/217111/anad_part_of_prototype_testing, Feb 7, 2019.