

航天用气瓶、贮箱分类及制造技术

白天¹ 阴中炜² 王冰² 微石²

(1 海军驻北京地区特种导弹专业军事代表室,北京 100076)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 气瓶、贮箱等压力容器是航天结构动力系统的关键部件,本文对我国目前航天用气瓶、贮箱产品分类及发展现状进行概述,介绍了航天用气瓶、贮箱的制造技术,并分析预测未来我国航天事业发展中,气瓶、贮箱等压力容器产品高性能化、轻质化、系列化的发展趋势。

关键词 旋压,气瓶,贮箱

中图分类号: TG146.2

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.05.002

Classification And Manufacturing Technology of Cylinder And Tank in Aerospace

BAI Tian¹ YIN Zhongwei² WANG Bing² WEI Shi²

(1 Beijing Special Missiles Representatives Department of Navy, Beijing 100076)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The pressure vessel of cylinder and tank are key components in space structural dynamic system. This paper summarized classification and current situation of cylinder and tank, introduced cylinder and tank manufacturing technology used in aerospace. The development trend of high-performance, light-quality, series cylinder and tank were predicted.

Key words Spinning, Cylinder, Tank

0 引言

航天动力系统用压力容器主要用于液体、气体介质的贮存,并承载一定的压力,实现动力推进、压力供给等功能,其主要包括贮箱和气瓶两大类。贮箱在航天器中主要用于液体介质的贮存,根据其结构种类和工作原理可分为表面张力贮箱、膜片式贮箱、胶囊式贮箱、膜盒式贮箱等。气瓶主要贮存气体介质,例如为航天推进系统中提供高压气体,按照其不同结构可分为金属气瓶和复合气瓶两大类。本文主要介绍航天用气瓶、贮箱分类及制造技术。

1 贮箱和气瓶产品分类及发展现状

压力容器已发展成为航天结构动力系统的关键部件之一,无论从结构质量还是从所占空间比来看,都占有极高比例,且其性能的优劣直接决定了航天器的使用寿命及可靠性。

1.1 贮箱产品

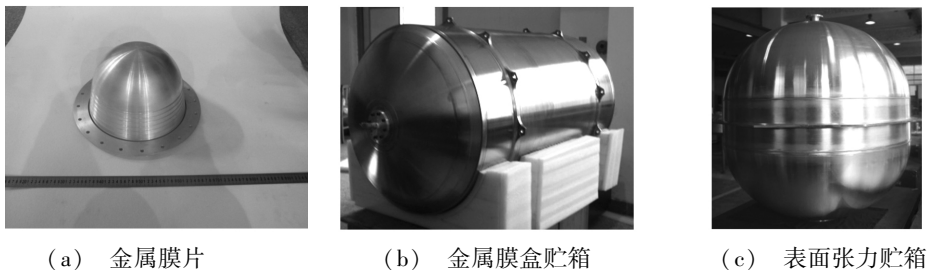
贮箱主要是为航天器的液体推进系统贮存和供应满足使用要求的推进剂,应与液体介质有良好的相

容性,能够长期贮存。在系统工作时,贮箱提供的推进剂不仅能夹带增压气体,且能够满足推进系统的流量需求。根据使用环境的不同,贮箱的结构类型也是多种多样,且有着各自的优缺点,图1为不同类型的贮箱产品及构件。

膜片贮箱是一种适用于空间工作的推进剂管理装置,主要由贮箱壳体和内置膜片构成,该贮箱具有寿命长、相容性好、排出效率高等优点。膜片与贮箱壳体采用绝对密封连接,工作时增压气体挤压膜片,将推进剂挤入输送管路,实现推进剂的供给。其中,膜片是膜片式贮箱的关键构件,最初的膜片以橡胶等高分子材料为主,但其长期储存问题难以解决,因此,当前膜片主要选用金属材料,应用较为广泛的是纯铝和纯钛膜片。在贮箱工作过程中,膜片经历从上半球翻转到下半球的弹塑性大变形,因此膜片能否按照预定要求有规律的翻转,是决定贮箱性能的关键因素。目前,国内外研究人员对膜片的几何形状、压力与厚度等参数对变形的影响开展了研究,并利用有限元模拟、物理试验等多种手段对膜

收稿日期:2015-07-13

作者简介:白天,1976年出生,硕士,工程师,主要从事航天材料及工艺方面的研究工作。E-mail:fevernova9180@163.com



(a) 金属膜片

(b) 金属膜盒贮箱

(c) 表面张力贮箱

图1 贮箱类产品

Fig. 1 Tank products

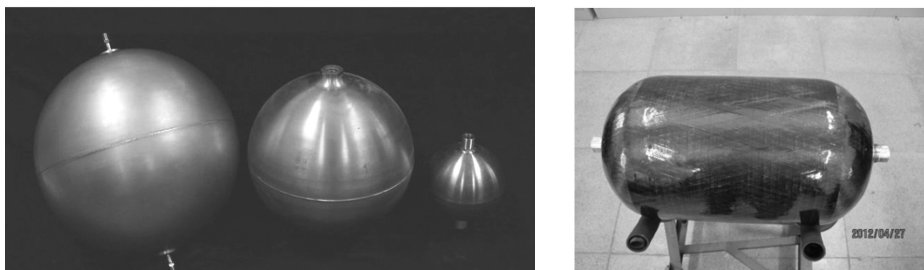
金属膜盒贮箱是一种可多次重复使用的贮箱,能够满足介质的重复加注、排放。该贮箱一般采用柱形结构,内部介质的加注和排放是依靠金属膜盒的伸缩而实现。在介质的充、放过程中,金属膜盒需要在壳体内部进行大范围的滑动,滑动过程中依靠贮箱内部结构的设计保证金属膜盒的平稳运行,在震动、变加速度等多种工况条件下,膜盒不能产生偏斜、卡死等现象,这就给贮箱的设计和加工都提出了更高要求;此外,与其他类型贮箱相比,由于金属膜盒贮箱内部结构相对复杂,所以质量相对较大。另外,由于贮箱壳体及膜盒均使用金属材料制造,因此,两者相容性好,介质加注可控性高,适用于不同种类介质的贮存,具有广泛通用性,而目前,膜盒式贮箱在国外航天器上的应用较多,国内航天领域正在逐步推广。

表面张力贮箱是依靠微重力环境下液体的表面张力原理对推进剂进行管理的一种贮箱,其主要作用是在工作阶段,在规定的流量和加速条件下,为发动机或推力器提供无夹杂的推进剂。该贮箱的核心部件是其内部的推进剂管理装置(PMD),通常情况下,

PMD具有实现使气、液分离并随时向发动机输送不夹气的推进剂,保持贮箱内推进剂在各种加速度环境下、稳定输出,控制推进剂质心位置不发生过大偏移,泄压放气过程中不带液排气等功能。由于表面张力贮箱只能在微重力环境下工作,因此,其具有独特优势:贮箱的可靠性高、加工难度小、对推进剂管理水平和环境适应能力强、携带推进剂和有效载荷质量比高、可重复利用、不易受污染等。目前,在空间微重力环境下工作的航天飞行器应用方面,如空间站、通信卫星、航天飞机等,具有囊式贮箱、膜片贮箱所不可替代的优势^[5-7]。

1.2 气瓶产品

航天用气瓶产品主要应用于航天器的推进系统、流体管理系统、试验系统等方面,其功能是为不同系统贮存和提供高压气体,根据气瓶的应用与结构可分为两大类:金属气瓶和复合气瓶,其中复合气瓶还可分为:金属内衬复合气瓶和塑料内衬复合气瓶,图2为不同类型的气瓶产品。



(a) 金属气瓶

(b) 复合气瓶

图2 气瓶类产品

Fig. 2 Cylinder products

金属气瓶早期应用最为广泛,以钢瓶产品为主,后因质量原因,其选材由钢类材料逐步发展为铝合金材料;目前,由于钛合金具有比强度、比刚度高,耐腐蚀性好,成形、焊接工艺性优良等优点,钛合金气瓶的研制成为国内外研究重点。金属气瓶的结构形式从环形气瓶、柱形气瓶到球形气瓶一应俱全,由于其依靠金属壳体承受气体压力,设计、制造工艺成熟,疲劳寿命航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第5期

命长,可靠性高,工作压力从几兆帕到数十兆帕,因此,在航天领域得到了广泛应用。

复合气瓶目前主要以金属内衬复合气瓶为主。该气瓶采用双层结构设计,以薄壁金属壳体作为支撑的内衬层和外表面缠绕复合材料的复合层组成。金属内衬层主要作用:(1)防止密封容器中贮存的高压气体及燃料泄漏;(2)作为缠绕成型时的支撑芯模;

(3) 内衬端接头作为容器对外的接口与连接界面。外表面复合层以树脂为基体材料,纤维作为增强材料,经缠绕固化形成复合材料层壳体,主要用于承载容器中的高压载荷。目前,由于铝合金具有良好的成形性能,一定的强度,密度小,在复合气瓶内衬加工上应用较多;而对于疲劳性能要求较高的气瓶,铝合金内衬往往不能满足使用要求,因此,选用强度高,较铝合金具有更高疲劳寿命的钛合金做为金属内衬。此外,对于一些有特殊需求的气瓶,如高压氧气瓶,其内衬材料仍选用不锈钢制作。复合气瓶外表面缠绕纤维的选用,由最开始的玻璃纤维到芳纶纤维,而到目前普遍采用的碳纤维,其性能不断提高,承载能力不断加大,为复合气瓶的安全使用提供了可靠保障。与全金属气瓶相比,复合气瓶质量轻、刚度好、容器特性系数高、可靠性高、抗疲劳性能好、负载工作寿命长、“爆破先于泄露(LBB)”安全失效模式、可设计性强等诸多优点,在航天领域的应用越来越广^[8-11]。

2 贮箱气瓶制造技术

航天用贮箱和气瓶均以薄壁回转结构为主,由于需要其在高压工作环境下,能够精确管理液体和气体贮存介质,因此,对产品的性能、可靠性、精度、批次稳定性等提出了较高要求。为了满足航天使用过程中所提出的更高要求,越来越多的新材料、先进工艺技术贮箱和气瓶的制造中得到了应用。

2.1 高性能材料

为了满足航天产品减重的迫切需求,贮箱、气瓶类压力容器产品的轻量化已成为发展趋势。传统以不锈钢材料生产的贮箱、气瓶已经很少应用在航天领域,已被铝合金、钛合金等一些轻质金属材料逐步取代。

钛的密度为 4.5 g/cm^3 ,是钢密度的 56%,其强度介于 $500 \sim 1400 \text{ MPa}$,比强度高,而且具有良好的低温适应性。其中,TC4 钛合金应用较为广泛,其长时间使用温度可达 350°C ,国外采用快速凝固/粉末冶金技术研制的某些高温钛合金,其使用温度可达 700°C 以上,目前,我国研制的 Ti55 高温钛合金使用温度可达 550°C ,而在更高温度下使用的钛合金也在实验室试制成功^[12]。在低温环境下,TA7 钛合金具有更高的强度、更高的塑性和韧性,已经在压力容器产品上得到应用,该材料室温强度一般在 700 MPa 以上,但是在液氢温度下 (-253°C) 却能达到 1.2 GPa 以上。

铝合金在贮箱、气瓶产品中应用的种类较多,以 5A06 和 2A12 为代表的 5 系和 2 系铝合金应用最为广泛。近年来,以 2195 为代表的铝锂合金材料和以 5B70 为代表的铝铍合金材料在国内已经实现了工业化生产。在铝中加入锂所形成的合金,可以有效降低合金的密度,增加刚度,同时仍然保持较高的强度、较

好的抗腐蚀性和抗疲劳性以及适宜的延展性,该合金在国外航天领域主要应用于一些航天飞机的外贮箱以及运载器的大型贮箱结构上。铝铍合金是一种集高强、高韧、低密、耐热、耐蚀、可焊等优异性能于一体的铝合金结构材料,其中 5B70 铝合金强度达到 420 MPa 以上,屈服强度在 300 MPa 以上,较 5A06 铝合金对应的 315 MPa 和 147 MPa 有大幅提升^[13]。采用 5B70 铝合金替代 5A06 铝合金制造贮箱壳体可减重 30% 以上,具有极为广阔的应用前景,目前国内已经在部分型号产品上应用该材料。

贮箱、气瓶所使用的非金属材料主要是在缠绕层上使用的碳纤维环氧树脂复合材料,其中,碳纤维是其核心材料。碳纤维材料从 20 世纪中期开始研制,到 70 年代末进行工业化生产,由于与其他高性能纤维相比,其具有高的比强度和比模量,因此,在航天领域得到了广泛应用。目前,市场上主要有 T300、T700、T800、T1000 等几种碳纤维,其抗拉强度从 3 GPa 到 7 GPa 不等,而据日本东丽公司报道,该公司已经制成了强度 9 GPa 以上的碳纤维,尽管如此,相对于 70.27 GPa 的理论强度,仍有较大的提升空间,可见,碳纤维在贮箱、气瓶产品上的应用还有更为广阔的空间。然而,与国外相比,我国碳纤维的研制进展缓慢,在应用上集中于低端领域,在碳纤维质量要求较高的航天领域的应用比例仅为 3%^[14-16],远远没达到国际上碳纤维行业在航天领域应用占比的平均水平,因此,航天产品使用大多数碳纤维仍然依靠进口。

2.2 先进制造工艺技术

航天用贮箱、气瓶的制造包括了金属和非金属的成形技术、加工工艺技术等,其中,金属成形及加工技术涉及较多,且种类多样化,各种成形工艺方法之间差异较大,而一些先进成形、加工技术的完善和研发也为贮箱、气瓶的制造带来了更多选择。目前,在航天用贮箱、气瓶制造领域涉及的金属成形加工技术主要有锻造、冲压、旋压、超塑成形以及粉末冶金技术等。

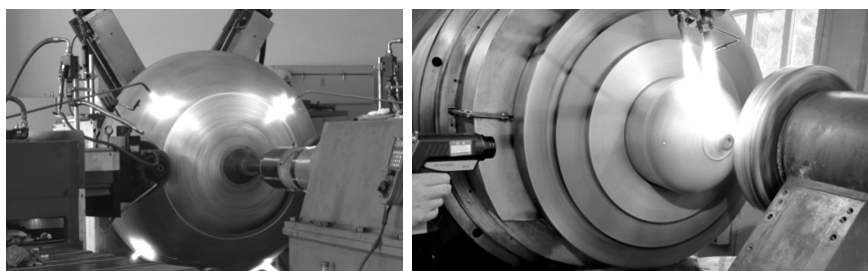
锻造和冲压技术作为金属材料成形的传统工艺技术,主要应用于贮箱、气瓶产品中封头、膜片等零件的生产制造,尤其对于批量生产的产品,锻造、冲压工艺的高效性和经济性得到了充分发挥。对于锻造和冲压工艺,设备能力是生产工艺能否实现的关键因素。早期我国工业基础薄弱,设备能力低下,限制了工艺技术的发展,近年来,国内通过自主研发和设备引进,使得我国设备能力大幅提升。目前,我国自主研发的世界最大吨位模锻压机在中国第二重型机械集团公司德阳基地正式进入试生产阶段,该设备可在 8 万吨 以内任意吨位实施锻造,最大模锻压制力可达

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 5 期

10万吨,成为世界上超大型模锻压机之一;另外,无锡透平叶片有限公司引进的世界上最大的3.55万吨螺旋压力机已经投入使用。设备能力的提升使得以前无法实现的工艺变为可能,一些大尺寸封头、膜片的锻造、冲压成形也得以实现。

旋压技术是通过旋转使之受力点由点到线、由线到面,同时在某个方向给予一定的压力,使金属材料沿着这一方向变形和流动而成型某一形状的技术,是一种综合了锻造、挤压、拉伸、环轧等工艺特点的无切削先进加工工艺,具有材料变形条件好、成形制品精度高、成本低廉、设备吨位需求小等优点,图3为压力容器壳体产品旋压成形过程。旋压工艺分为普通旋压和强力旋压两种。不改变坯料厚度,只改变坯料形状的旋压叫普通旋压,主要用于成形一些半球形、椭球形以及曲母线零件;既改变坯料厚度,又改变坯料

形状的旋压叫强力旋压,主要用于成形筒形件、锥形件。航天用贮箱和气瓶主要为薄壁回转体构件,而旋压技术正是针对这类薄壁回转体零件成形的先进工艺技术,尤其适用于单件、小批量的航天产品生产,其研制周期短、工装、模具简单、成本低等优势就更为明显,因此,目前大多数的贮箱、气瓶产品均采用旋压工艺制造生产。针对无焊缝气瓶的制造,多采用无芯模收口旋压技术,该技术是普通旋压成形中的一种特殊工艺,能够实现圆柱形压力容器壳体的整体成形,且产品不需要采用焊接工艺将壳体连接在一起,能够大大提高压力容器的性能及可靠性,目前该技术在复合气瓶的金属内衬成形及一些圆柱形贮箱壳体成形中得到了应用。从整体上来看,我国旋压技术的研究应用水平很高,特别是在旋压成型工艺及装备方面,已经处于领先地位。



(a) 大型贮箱壳体热旋压 (b) 无芯模收口旋压

图3 旋压工艺过程

Fig.3 The spinning process

超塑成形(SPF)是一种利用材料在特定的温度区间内具有极高延伸率的特性,使用气压或其他外力作为成形驱动力,依靠模具来保证成形精度的一种材料成形方法。由于超塑成形技术是在高温及控制应变速率下进行,成形温度一般高于退火温度,因此,超塑成形后的零件尺寸稳定、且无残余应力。相对常规塑性成形时易出现的各种缺陷,超塑成形的优点十分突出,因而,超塑成形得到了越来越广泛的应用,尤其适用于钛合金等冷加工成形困难材料的钣金件制造。

对于超塑成形的贮箱、气瓶等压力容器,国外早已得到广泛应用,例如美国爱德华空军基地的火箭推进研究所早在20世纪80年代就进行超塑成形制造推进剂贮箱的试验研究,试验产品是Ti6Al4V半球形壳体。以前这种半球是由厚壁锻坯加工而成,此加工方法生产周期长,成本高。采用超塑成形技术后,大大减少了机械加工时间,提高了材料利用率。欧空局采用SPF技术制造贮箱的典型应用是在90年代,阿里安5姿态控制系统的贮箱至今仍采用这种SPF技术制造。国内超塑成形技术虽然起步较晚,但是近些年来在一些重大航天项目的牵引下发展迅速;某型号环形气瓶就是采用超塑成形方法来制造的,成形时先宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第5期

采用板材超塑气胀方法成形出钛合金半环,再采用机械加工校正半环的厚度和形状,最后通过电子束焊接将两个半球组合到一起。此外,采用超塑成形制造了一种500L钛合金表面张力贮箱,通过特殊的正反胀形工艺来控制板材在超塑成形后的壁厚,精确的保证了后续精加工的余量,明显提高材料利用率和生产效率,图4为超塑成型技术生产贮箱。目前上述两种产品均已得到成功应用。



(a) 钛合金环形气瓶 (b) 钛合金500L贮箱

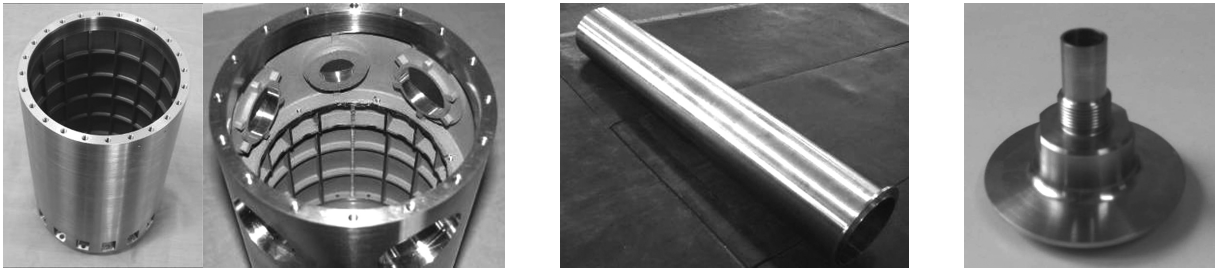
图4 超塑成型技术生产贮箱

Fig.4 Superplastic forming technology to produce the tank

高性能粉末冶金工艺是以金属粉末(或金属粉末与非金属粉末的混合物)作为原料,经过成形和烧结,制造金属材料、复合材料以及各种制品的工艺,是

一种集合了传统铸造、锻造工艺优点的新工艺技术,既能够实现复杂形状构件的近净成形,又能确保制品的性能达到锻件水平,同时,该工艺还可以在成形的同时实现双金属扩散连接,满足某些贮箱、气瓶接口的特殊需求。目前,我国粉末冶金行业已经经过了近10年的高速发展,对于高性能粉末冶金技术的研究

日趋成熟,各种大尺寸、复杂构件成形技术均已突破,该技术必将在航天用贮箱、气瓶产品的制造中得到更为广泛的应用。图5为粉末冶金成形的贮箱产品及某型号贮箱用钛钢复合接管嘴,两种贮箱产品均已通过地面性能试验,接管嘴产品已经通过飞行验证。



(a) 大型环柱形粉末冶金筒体

(b) 柱形粉末冶金薄壁壳体

(c) 粉末冶金双金属接管嘴

图5 高性能粉末冶金产品

Fig. 5 High-performance powder metallurgy products

3 发展趋势

随着我国航天事业的不断发展,贮箱、气瓶类产品的种类越来越多样化,其设计与制造技术也在快速发展壮大。但是目前,无论是贮箱、气瓶产品的研制技术,还是产品的生产工艺与国外相比仍存在较大差距,产品种类虽然较多,但不成系列,这些问题都是我国制造航天用贮箱、气瓶技术亟需解决的问题。

从航天用贮箱、气瓶的使用情况来看,这类产品在航天器中所占的质量比重大,因此,产品的轻质化显得尤为重要,其中,需要解决的一系列技术难点是推进产品轻质化的关键工作。选用金属材料与复合材料交替使用,而制造出的复合贮箱、气瓶能够有效降低产品的质量,此外,采用新型轻质金属材料替代传统金属也能够大幅减轻结构质量。因此,更多的复合结构贮箱、气瓶替代传统的全金属产品,以及越来越多的先进轻质金属材料的应用,是未来航天用贮箱、气瓶技术发展的必然趋势。

目前,我国设计、生产制造单位繁多,管理标准复杂,技术整体规划相对落后,导致现有贮箱、气瓶类产品的生产主要是根据不同型号的需要而研制,消耗了大量的研制经费和时间,而且新产品的使用需要经过一定时间的考核论证,这不仅拖延了型号的使用,也降低了产品的可靠性。而贮箱、气瓶产品的系列化实现,需要总体结构与分系统的相互协调,以及制造单位的规范化、统一化。目前,为了适应我国航天事业的飞速发展,面对任务量大、时间紧迫的当前形势,如何使多方面因素达成统一,实现贮箱、气瓶产品系列化管理,从根本上降低生产成本、提高使用可靠性,是航天用贮箱、气瓶发展的一个关键课题。

参考文献

[1] 吴安达,王亲猛. 推进剂贮箱锥形金属膜片的翻转

特性研究[J]. 上海航天,2012,29(4):59-60

[2] 周仕明,袁杰红. 金属膜片贮箱膜片变形的数值模拟与失效分析[J]. 上海航天,2005,6:13-16,54

[3] 朱志华,胡小平,陈香林. 钛制金属贮箱膜片的有限元分析[J]. 火箭推进,2007,33(4):33-34

[4] 张增亭. 金属膜片贮箱膜片的数值仿真与试验验证[J]. 火箭推进,2009,35(3):26-29

[5] 李永,潘海林,魏延. 第二代表面张力贮箱的研究与应用进展[J]. 宇航学报,2007,28(2):503-507

[6] 魏延明. 卫星用表面张力贮箱的设计、应用及其发展[J]. 控制工程,2003,2:6-17

[7] 薛国宇,陈志坚,王德忠. 低温表面张力贮箱研究[J]. 火箭推进,2005,31(3):26-29

[8] 肖文刚,何志华,王浩. 航空用球形复合材料压力容器研制[C]. 玻璃钢学会第十六届全国玻璃钢/复合材料学术年会论文集,2006:251-253

[9] 王荣国,矫维成,刘文博,等. 轻量化复合材料压力容器研究进展[J]. 航空制造技术,2009,(15):86-89

[10] 宋大君,王荣国,刘文博,等. 航天用复合材料压力容器的应用与发展[J]. 宇航材料工艺,2010,40(6):24-26

[11] 于斌,刘志栋,靳庆臣,等. 航天复合材料压力容器研制技术[J]. 2012,29(5):54-59

[12] 张绪虎,单群,陈永来,等. 钛合金在航天飞行器上的应用和发展[J]. 中国材料进展,2011,30(6):28-32

[13] 刘春飞. 新一代运载火箭箱体材料的选择[J]. 航空制造技术,2003(2):22-27

[14] 李威,郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学,2011,4(3):201-210

[15] 王雪娟. 碳纤维的发展及其应用[J]. 四川理工学院学报,2009,24:202-206

[16] 陈杰,吴永兴,张振声,等. 国内碳纤维发展态势分析[J]. 高科技纤维及应用,2007,32(2):22-25

(编辑 李洪泉)