

纤维骨架柔性高分子多层复合材料及其典型应用

乔路¹ 刘文博¹ 刘洋² 牛健壮² 周妍^{3*}

1. 海装沈阳局 吉林长春 130000

2. 国家石油天然气管网集团有限公司西部管道有限责任公司 甘肃兰州 730000

3. 中国科学院长春应用化学研究所 吉林长春 130022

摘要: 系统分析了纤维骨架增强柔性高分子多层复合材料的结构特点、性能优势及其在多个高技术领域的应用进展。该类材料通过将高强度纤维与柔性高分子基体复合,兼具高强、轻质、柔韧和耐疲劳等特性,显著优于传统金属与硬质材料。文中着重介绍了其在浮空器囊体、柔性储油装置、便携式高压氧舱及海底输油软管等方面的典型应用,展现了其在航天、海洋工程、医疗和能源输送等领域的重要价值。这类复合材料随着新材料和先进制造工艺的发展,将有更加广阔的应用前景。

关键词: 纤维骨架增强; 柔性高分子复合材料; 浮空器囊体; 柔性储油囊; 高压氧舱

1. 引言

纤维增强复合材料(fiber-reinforced composite materials)是由纤维和基体材料复合而成的材料。其中,纤维骨架增强柔性高分子复合材料是在柔性高分子基体(如橡胶、热塑性弹性体、柔性树脂)中嵌入高强度、高模量纤维(作为骨架/增强体)而形成的一种特殊复合材料,通常存在于多层结构中。这种结构设计巧妙地结合了纤维的刚性与高分子基体的柔性,能够最大限度地发挥各组分材料的性能优势,兼具轻质高强与高韧性。相较于金属材料及硬质复合材料,该类材料具有无可比拟的加工自由度、形状适应性和结构设计灵活性^[1,2],已成为航空航天、深海极地等极端工况服役装备的重要组成部分。下文将介绍一下它的主要应用。

2. 浮空器用囊体

浮空器(图1)囊体是纤维骨架增强柔性高分子多层复合材料在航空航天领域最典型的应用。它的结构通常由外至内包括:耐候层、阻隔层、中间层、承力织物层和热封层[3,4]。通过优选和替换各功能层材料,能够优化综合性能,满足不断更新的设计要求。美国、英国和日本等国家在积极推动平流层高空飞艇技术的发展,并已成功完成多项飞行试验。例如,高空飞艇、平流层飞艇、高空哨兵(Hi Sentinel)系列飞艇、同温层巴士(Stratobus)以及传感器结构一体化飞艇(ISIS)等^[5]。在自主研制的“极目一号”浮空艇上,我国的浮空器技术方面也取得了一系列成果,连续刷新了科考海拔纪录;“祥云”AS700载人飞艇,已成功完成多次低空旅

游应用场景演示飞行。



图1 典型的浮空器

美国TCOM公司的Mark7-s系留气球与YEZ-2A飞艇用囊体材料采用了双层阻隔层的设计,由内至外为Tedlar/Hytrel/PET/Hytrel/PET/Hytrel/涤纶织物/Hytrel^[6]。进入九十年代以后,Hytrel被性价比更好的聚氨酯(TPU)取代,涤纶纤维织物被比强度更大的聚芳酯(Vectran)纤维织物取代。美国Uretek公司生产的3216LV成为了我国早期进口囊体材料的主要型号,该材料外层为Tedlar,阻隔层为PET,承力层为Vectran,热封层为TPU^[7]。

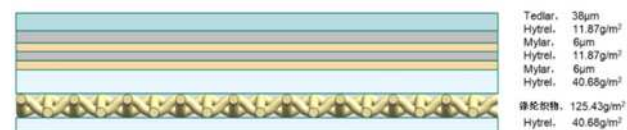


图2 美国TCOM公司的Mark7-s系留气球囊体材料结构^[5]

日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)在其平流层飞艇囊体材料研究中,设计了基于Vectran织物和Zylon织物的

两种囊体材料。两种囊体材料的耐候层和热封层都采用聚氨酯 (TPU)，阻隔层采用 EVOH^[8]。



图 3 日本 JAXA 的囊体材料多层结构设计示意图

我国囊体材料的技术发展始于 20 世纪 70 年代，从最开始的仿制期，逐渐进入技术突破期与快速发展期。2010 年左右，中科院长春应化所先后攻克了在科考浮空艇、平流层飞艇、机动式多用途系留球与载人飞艇等方面成功应用的轻型高强度囊体材料层间界面构建、高阻隔、高耐候、耐搓以及光热控制等关键技术 (图 4)。



图 4 “极目一号”与 AS700 载人飞艇

此外，这种多层结构形式的柔性复合材料还可以用作着陆气囊、充气雷达天线、卫星可展开柔性结构、充气反射器和充气隔热罩等。

火星探路者气囊系统由涂有硅树脂的 Vectran 织物制成 [9,10]，用于火星着陆器和探测车的缓冲，如图 5 所示。气囊在距地面约 330 英尺的高度在几秒钟内通过固体火箭发动机驱动的气体发生器充气。反向火箭随后将飞行器减速到距地面 70 英尺的高度，飞行器以 18G 的减速度下降。撞击后，组件从地面反弹 51 英尺，并继续反弹 15 次，直到完全停止。气囊随后放气并收回着陆器。气囊系统成功保护了航天器，并使“旅居者”号探测车开始了它的任务。类似的气囊系统

被用于保护与回收后续的“勇气号”火星探测车和“机遇号”火星探测车。



图 5 火星探路者大型多叶气囊^[9]

3. 柔性储油囊体

传统的金属罐储存石油、化学品、泥浆等流体，存在建设周期长、成本高、场地受自然地理条件限制、海上储油船租赁费用高等缺点。柔性储油囊体以高性能纤维为骨架复合柔性密封树脂而成，具有可折叠、运输便捷、安装灵活和快速部署等优势，可直接应用于地形复杂的野外作业场地或空间有限的海上平台，投放于深海则兼具隐蔽性与安全性，可大幅提升油料保障能力和机动性^[11,12]。在长途客车等设备上还可作为燃油应急装置使用柔性油料储运囊体。目前市场上主流的油囊材料多为耐油密封层的纤维，聚氯乙烯 (PVC) 或热塑性聚酯 (TPU)。

水下储存液体的软体容器设想是由苏联 H. A. Borodin 在 1935 年提出的^[13]。60 年代初，美国海军采用尼龙纤维作为骨架，两侧涂有合成橡胶，研制出用于墨西哥湾的容量为 190 m³ 的软体油罐。受限于橡胶的耐腐蚀性，前期产品主要多以临时储存燃油为主。80 年代后，氟橡胶、氯丁橡胶等耐油弹性体的应用显著提升了储油囊的化学稳定性。1995 年，美国 FMF Composite Systems 公司推出橡胶基复合材料 Flexcel 系统，利用车辆自重加压实现前线装甲部队燃油快速空投补给，可空投至前线支持装甲部队作战。21 世纪初，随着高性能纤维的快速发展，凯夫拉增强的弹性体涂层织物经硫化后可实现高密封性，满足了 F1、NASCAR 等赛事对燃油囊轻量化与安全性的严苛要求。例如，一级方程式赛车使用的新型燃料囊，由美国杜邦公司生产的 Kevlar® EXO™ 提供了卓越的抗冲击和耐磨性，使整体重量降低了 20% 以上。



图 6 水下储油囊实物图

我国经纬复合新材料公司于 2017 年 3 月提出水下柔性储油概念，联合哈尔滨工程大学、哈尔滨工业大学以及中国科学院长春应化所等科研机构为马来西亚国家石油公司研发了水下柔性储油装置，并按照美国石油协会 API17N 要求，完成储量 250m³ 样机在 30 米水深的海洋应用验证（图 7）。



图 7 水下储油囊海洋应用验证

4. 便携式高压氧舱

高压氧 (HBO) 是指在 2.0~2.5ATA (1ATA 约等于 0.1MPa) 氧压下进行治疗的方法，此时氧气的有效弥散半径得以扩大，弥散深度和范围有所提升。HBO 可治疗近百种疾病，覆盖多个临床科别，特别是在心肺复苏、神经系统、心血管、感染、中毒、减压病和气栓症等临床疾病的治疗上表现出良好的疗效 [14,15]。当前医院依然以钢制氧舱为主，存在重量大、成本高、机动性差，治疗前后准备时间过长，易耽误救治等缺点。

国外便携式加压舱可以随时部署，适用于急救。1996 年 Shimada 等研制出软体高压氧舱，用于医疗急救，其原料为涂覆氨基甲酸的尼龙 [16]。随后，出现了 Gamow 轻便折叠

加压袋，用于登山时急性高山病。最初 Gamow 袋的工作压力较低，主要是在高原时将舱内压力维持在平原的大气压水平，稳压时间为 6~8h，并主要用于高原病的预防与治疗。由于医学救治的需要，经过改良后的 Gamow 袋，其工作压力可达到 0.20MPa；在 0.15MPa 的情况下，维持 10 天左右的稳压时间。

英国的 Oxygens、西班牙的 OxyHealth Europe 等公司生产的软质高压氧舱耐压值在 1.3~1.5ATA 范围内，主要用于保健。意大利 GSE 系列便携式加压舱的舱体由软质材料构成，耐压值为 1.5ATA，重 90kg。奥地利 AHA Hyperbarics 公司生产的软质氧舱（图 8）的耐压值最高可达 3.0ATA。

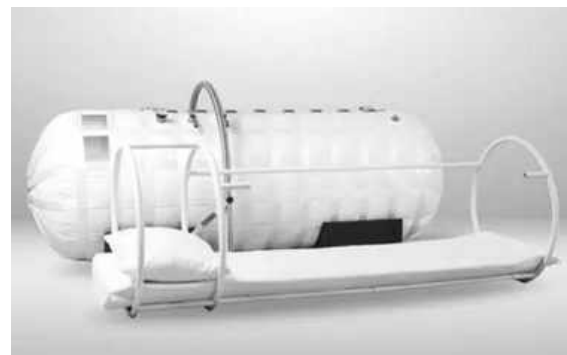


图 8 奥地利 AHA 公司生产的氧舱

折叠式轻便加压舱是由军事医学科学院卫生学环境医学研究所于 1991 年在国内首次研制成功，并已经成功装备高原部队，在军事、经济、社会等方面均产生了重大效益 [17]。其极限压力为 0.18MPa；在工作压力不大于 0.15MPa 的情况下，在高原地区治疗高原反应时，只能使用安全系数高的间距。2011 年，蔡锋等为单兵分队在高原执行任务中及时救治高原急性疾病伤员研制出便携式高原空气加压氧舱。全长 2 米、便于携带的增压氧舱系统，在海拔 4000 米的高原测试中，在有人乘坐的情况下，舱体大约需要 7 分钟，在这样的速度下，人并没有十分强烈的不适感，达到了氧舱充气的要求 [18]。威奥颐摩公司生产的 O2 ark 高压氧舱采用高铁轻量化复合材料，用于冬奥会运动员的日常恢复。MACY-PAN 系列微压氧舱，由上海宝邦医疗器械有限公司生产，耐压值为 1.3ATA，主要用于家庭保健。总体来看，国内外便携式氧舱在不借助加强结构的情况下，耐压值很难突破 2.0ATA，无法用于紧急救治。中国科学院长春应用化学研究所在前期轻质高强航空材料的研究基础上，开发了一款耐压值大于 2.0ATA 的高压氧舱用材料，多次迭代后，制

造的氧舱的安全性和有效性已得到验证,并获得了 2023 年全国和吉林省博士后创新创业大赛银奖和一等奖。

5 输油输气软管

油气管道作为能源传输的关键通道,其安全与稳定的运行对确保国家能源安全和满足民生需求至关重要。相比于传统钢制结构的输油输气管道而言,纤维骨架增强高分子柔性复合软管具有可设计性强、重量轻、耐腐蚀、地形适应性好等优点,在管道保供抢修、海底输油输气等领域具有重要应用^[19]。其结构从内至外往往包括树脂内衬层/纤维增强层/外护套层^[20],如图 9 所示。其中,作为直接接触输送介质的结构层,内衬层需要密封性好、摩擦阻系数低、防腐等,比较常用的有热塑性树脂如聚乙烯(PVDF)、尼龙(Nilon)、聚偏氟(PVDF)等。增强层是管道的中间部分,既要有效承受输送介质的内部压力,同时也需兼顾管道在纵向和横向上的压力平衡。最外层是保护层,发挥着重要的保护作用,能够防止管体外层的磨损和紫外线老化^[21]。



图 9 软管的常见结构及优点^[20]

早在 20 世纪 90 年代,欧洲便率先研制出芳纶增强的柔性复合管。1995 年 6 月,英国壳牌公司生产的全球首条在英国连续生产的柔性复合输油管。2000 年开始,芳纶增强的塑料管在输油管线以及管道修复工程中开始大量应用^[21]。PipeLife 公司生产的 SoluForce H2T 管的外层及内层是 HDPE,增强层采用的是芳纶纤维带,铝层作为阻隔层,可以用于氢气输送。STOLHAS 作为粘接柔性软管的开山鼻祖,研制出适用于不同需求的 GL-PE、CL-PA12 和 CL-PVDF 管,从而达到生产需求和成本控制的双重目的^[20]。

天津市海王星海上工程技术有限公司对于静态海底软管的设计、研发和制造做出了巨大贡献,2015 年,河北恒安泰公司生产的海底软管开始在中国海油应用,动态软管的国产化也由宁波东方电缆股份有限公司突破并在南海某油田投入应用。

此外,具有类似结构的软管还可以用于失效海管和陆

地油气管的抢修或修复。2013 年夏天,PetronasSamarang 油田,马来西亚石油顺利完成了内衬管在海上的安装工作。管材内层为 SOLVAY 公司生产的 PVDF,中间层为 DUPONT 公司生产的 KIFA 纤维,外层为 BASF 公司生产的 TPU 22。目前,国内外衬管材主要生产厂家为德国拉德林格尔公司。

6 总结

纤维骨架增强高分子柔性复合材料通过将高强度纤维的刚性与柔性高分子基体的弹性完美结合,创造出一种性能独特且可高度定制化的材料。其核心优势在于同时兼顾高强度、高模量、优异的柔韧性、出色的抗疲劳性和可设计性。这使其成为在航空航天、汽车、能源、海洋、医疗等高科技领域和众多工业领域,解决动态载荷、复杂变形、恶劣环境等苛刻工况下传统刚性材料太脆、难变形和纯柔性材料强度低、易变形应用瓶颈的理想选择,具有不可替代的地位和广阔的发展前景。

这类复合材料的性能和适用范围将随着高性能纤维和新型柔性高分子基体的不断发展而不断扩大,以及先进制造工艺的进步,如自动铺放、立体编织、增材制造等。

参考文献:

- [1] 陈佳,夏忠林,洪波,等. 芳纶纤维的表面改性及增强高分子复合材料的研究进展[J]. 广州化工, 2017, 45(24): 3-5,22.
- [2] 尹文娅. 抗蠕变芳纶经编柔性复合材料设计与制备[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [3] Schäfer I, Küke R, Lindstrand P. Airships as unmanned platforms: challenge and chance[C]//1st UAV Conference. 2002: 3423.
- [4] Meng J, Cao S, Qu Z, Li J, Lv M. Thermoelasticity of a fabric membrane composite for the stratospheric airship envelope based on multiscale models[J]. Applied Composite Materials, 2017; 24(1): 209-220.
- [5] 杨宇明,盛德鲲,刘向东. 平流层飞艇囊体材料[M]. 北京,国防工业出版社, 2021.
- [6] Barlow D. Airships: their time has come again [C]// Airships to the arctic symposium proceedings. 2002: 15-23.
- [7] Lv J, Zhou Y, Zhang Y, Nie Y, Wang Q. Study of performance of aerostat envelope materials on the coast[J]. Frontiers in Materials, 2022, 9: 992984.

- [8] Kimito T, Yasumasa H, Maekawa S. The studies and applications for LTA [C]//Proceedings of the 17th AIAA lighter-than-air systems technology conference. 2007, 7732.
- [9] 赵秋艳. 火星探路者的可膨胀气囊着陆系统综述 [J]. 航天返回与遥感, 2001, 22(4):7.
- [10] 郑光. 火星着陆器着陆缓冲机构性能及其软着陆动力学研究 [D]. 南京, 南京航空航天大学, 2020.
- [11] 祝孟洁. 便携式燃油储运装置设计. [D]. 舟山, 浙江海洋大学, 2017.
- [12] 王建超, 杨建雄, 张鹏. 聚氨酯储油囊油渗透影响因素及改进方法研究 [J]. 特种橡胶制品, 2017, 38(5):4.
- [13] 初新杰. 海上储油技术现状及水下无污染储油模式探讨 [J]. 装备制造技术. 2011, 4: 141-143.
- [14] 许肖楠. 高压氧预处理对术后认知功能障碍的疗效及其安全性的 meta 分析 [D]. 长春, 吉林大学, 2024.
- [15] 李柯伶, 杨湘彬. 探究高压氧联合依达拉奉在一氧化碳中毒患者中的临床疗效及对预后的影响 [J]. 现代医学与健康研究, 2025, 9: 51-53.
- [16] Shimada H, Morita T, Kunimoto F, et al. Immediate application of hyperbaric oxygen therapy using a newly devised transportable chamber [J]. American Journal of Emergency Medicine, 1996, 14(4): 412-417.
- [17] 王贺新, 吕永达, 马智, 等. 高原轻便加压舱 (袋) 的研制 [J]. 解放军预防医学杂志, 1992, 10(2): 4.
- [18] 王莹, 杨莹, 杜江波, 等. 车载移动式高压氧舱在高原的应用 [J]. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(46): 267.
- [19] 陈海. 国产海底软管在海上油气田的应用 [J]. 石油机械, 2016, 44(5): 61-65.
- [20] 张玉, 郭玉晗, 王庆松, 等. 海洋复合管缆设计关键技术与挑战 [J]. 船舶工程, 2024, 46(8): 126-137.
- [21] 全娇娇. 集输油用柔性复合管的环境适用性 [D]. 西安. 西安石油大学, 2022.
- [22] 刘海超, 金磊, 杜晓杰. 海底管道内衬复合软管修复技术国内外应用现状 [J]. 化工管理, 2020(36): 3.
- 作者简介:**
- 乔路 (1989.06-), 男, 汉族, 吉林省吉林市人, 本科学士学位, 助理工程师, 研究方向: 囊体材料质量体系研究;
- 刘文博 (1995.01-), 男, 汉族, 吉林长春市人, 本科学士学位, 助理工程师, 研究方向: 囊体材料质量体系研究;
- 刘洋 (1986.11-), 男, 汉族, 安徽省砀山县人, 本科学士学位, 高级工程师, 研究方向: 应急与维抢修;
- 牛健壮 (1969.02-), 男, 汉族, 山东省文登区人, 本科学士学位, 高级工程师, 研究方向: 应急与维抢修。
- 通讯作者:**
- 周妍 (1992.12-), 女, 汉族, 山东济宁人, 本科, 副研究员, 研究方向: 高分子多层复合材料功能化研究。