

# 高性能蒙皮材料力学性能研究

## Study on Mechanical Properties of High Performance Envelope Materials

李斌太, 邢丽英, 周正刚, 蒋诗才, 陈祥宝

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

LI Bin-tai, XING Li-ying, ZHOU Zheng-gang,

JIANG Shi-cai, CHEN Xiang-bao

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 研究了不同高性能纤维织物的结构形式与力学性能的关系, 几种纤维织物中, 聚对苯撑苯并双噁唑(PBO)纤维制备的增强织物具有较高的拉伸性能。利用高性能纤维织物制备了蒙皮材料, 对其力学性能进行测试。结果表明: 蒙皮材料拉伸断裂强力主要取决于采用的纤维种类和增强织物结构, 而蒙皮材料的撕破强力除了与使用的纤维有关, 还与纤维纱线细度有关, 纤维纱线细度越大, 制备的蒙皮材料撕破强力越高。

**关键词:** 蒙皮材料; 高性能纤维织物; 断裂强力; 撕破强力

中图分类号: V254.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)12-0001-04

**Abstract:** The relationship between the weaves and the mechanical properties of several high performance fabrics, including PBO (p-phenylene benzobisoxazole) fabrics, was investigated. Among them the fabrics made from PBO fiber showed better tensile properties. Laminated envelope materials, produced by bonding fabrics together with other function components were tested mechanically. For laminated envelope material, breaking strength is mainly dependent on the fibers making them up and the structural characteristics of the fabric. Besides the fibers being used, tearing strength relates strongly to the linear density of the yarns. Higher linear density of the yarns would be useful to increase the tearing strength.

**Key words:** envelope material; high performance fabric; breaking strength; tearing strength

临近空间低速飞行器由于在军事侦察、空间预警、通信中继和空间探测等领域的应用优势, 近些年来日益受到人们的关注<sup>[1,2]</sup>。蒙皮材料作为飞艇的主体结构材料, 其性能的高低直接影响飞艇的应用效能, 如浮空高度、持续飞行时间、有效载荷、服役寿命等<sup>[3]</sup>。

对于工作在平流层以氦气为浮升气体的飞艇, 要求采用的蒙皮材料具有较低的面密度, 优异的氦气阻隔性能及耐环境性能。由于其在服役过程中蒙皮内外存在压差, 因此蒙皮材料必须具有足够的力学性能, 如美国联邦航空管理局的飞艇设计准则<sup>[4]</sup>中, 关于蒙皮材料方面的要求包括: (1) 可以充压形成超压结构; (2) 蒙皮强度不低于限制载荷的4倍; (3) 蒙皮在承受限制载荷时撕裂不扩展。日本国家航天实验室在给平流层氦气飞艇项目设定的技术指标中, 断裂强力为  $1000\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 面密度为  $180\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 透氦率不大于  $2\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot 0.1\text{MPa})^{-1}$ <sup>[5]</sup>。由于任何单一材料均无法同时满足这些要求, 现代的蒙皮材料均采用多层复合结

构, 一般包括承载层、阻隔层、耐环境和气候层以及各功能层之间的胶黏剂。

在高性能蒙皮材料中, 承载单元层一般使用具有较高比强度的高性能纤维织物。目前, 对飞艇更高的设计要求也对蒙皮材料的性能提出了新的要求, 如Lindstrand HALE飞艇的体积为  $18000\text{m}^3$ , 使用的蒙皮材料面密度为  $295\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 断裂强力为  $1460\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 而若制备体积达  $20000 \sim 40000\text{m}^3$  的200米级平流层飞艇, 要求蒙皮材料在面密度不超过  $210\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$  的情况下, 断裂强力达到  $1460\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$ <sup>[6]</sup>。近些年来, 各种高性能纤维的发展为制备高性能蒙皮材料提供了很大帮助, 美国、日本和欧洲等西方国家均对高性能纤维在蒙皮材料中的应用进行了大量的研究, 制备的蒙皮材料性能大幅度提高<sup>[7,8]</sup>。本工作根据蒙皮材料性能和结构设计要求, 制备了超高分子量聚乙烯(UHMWPE)、聚对苯撑苯并双噁唑(PBO)纤维等具有高比强度的高性能纤维织物, 考察了其结构形式与

力学性能之间的关系,设计制备了多层结构复合蒙皮材料,并对蒙皮材料的力学性能与行为进行了研究与分析。

## 1 蒙皮材料的制备与实验

### 1.1 原材料

蒙皮材料增强织物使用的纤维包括:芳纶纤维,牌号 Kevlar 29, 纱线细度 111tex, 杜邦公司生产;超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维, 纱线细度为 23tex 和 156tex, 分别由北京同益中特种纤维技术开发有限公司和北京特斯顿新材料技术发展有限公司生产;聚对苯撑苯并双噁唑(PBO)纤维, 纱线细度 110tex, 日本东洋纺公司生产。几种纤维的具体性能指标如表 1 所示。气体阻隔层和耐环境功能层分别选用聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和聚氟乙烯(PVF)薄膜。蒙皮材料各功能层之间复合采用的聚氨酯胶黏剂由北京泽泰科技有限责任公司提供。

表 1 不同高性能纤维的性能

Table 1 Properties of different high performance fibers

Fiber	Breaking tenacity/ (N · tex <sup>-1</sup> )	Elongation at break/ %	Density/ (g · cm <sup>-3</sup> )
PBO	3.70	3.5	1.54
Aramid	2.03	3.6	1.43
UHMWPE	3.20	2.9	0.97

### 1.2 织物与蒙皮材料制备

根据各种纤维纱线的细度,计算出相应面密度织物所需的织物密度,然后将各种纤维编织成不同面密度和平纹、斜纹类型的织物,用以研究各种纤维织物的力学性能。按照特定设计要求利用聚氨酯胶黏剂将纤维织物与 PET 和 PVF 薄膜复合在一起,即得到实验用蒙皮材料样品。

### 1.3 性能测试

断裂强力的测试标准采用 GB/T 3923.1—1997《纺织品织物拉伸性能第 1 部分:断裂强力和断裂伸长率的测定条样法》;撕裂性能的测试依据 GB/T 3917.3《纺织品织物撕破性能第 3 部分:梯形试样撕破强力的测定》。

## 2 结果与分析

### 2.1 高性能纤维织物力学性能

高性能蒙皮材料的制备过程需要考虑织物在蒙皮材料制备过程中的工艺特性,在织物编织过程为了便

于工艺操作,对纱线进行了加捻处理。适度加捻有利于织物编织操作,且在拉伸过程中能够增加纱线内部摩擦力,提高纱线断裂均匀性,但捻度增加后纱线直径减小,导致织物稳定性降低,而且与 PET 薄膜复合的效果也会受影响。加捻对细度为 110tex 的 PBO 纱线拉伸性能的影响如表 2 所示,可以看出,当纱线的捻度分别为 30, 60, 90 捻回/米时,纱线的断裂强力和断裂伸长率差别较小。综合考虑,在编织织物时纤维纱线的捻度均采用 30 捻回/米。

表 2 加捻 PBO 纱线的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of twisted PBO yarns

Twist/(turns per meter)	Breaking strength/N	Elongation/ %
30	360	2.96
60	365	2.97
90	369	2.98

将 PBO, Kevlar29 和 UHMWPE 纤维编织成具有不同面密度和平纹、斜纹组织的织物,分别测试其拉伸断裂强力,测试结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,在面密度相同而织物类型分别为平纹和斜纹组织时,二者的断裂强力非常接近,这是由于总体上织物编织密度较低,因纤维纱线的屈曲、摩擦和经纬向耦合作用导致的织物性能差异较小。然而在采用不同的织物组织形式时,织物的稳定性有明显区别,斜纹织物容易发生变形,稳定性不如平纹织物,这将影响到织物在制备蒙皮材料时的工艺特性。

实验采用的几种高性能纤维中,PBO 为直链芳杂环高分子,被认为具有接近高分子极限的强度和模量,拉伸强度最高,UHMWPE 的拉伸强度次之,Kevlar29 的拉伸强度相对较小。与纤维的拉伸强度相对应,在同样的面密度时,PBO 织物的断裂强力较高,UHMWPE 织物的断裂强力低于 PBO 织物,Kevlar 织物在三种织物中的断裂强力最低,其中小丝束 UHMWPE 织物由于编织织物的均匀性好,其断裂强力略高于大丝束 UHMWPE 织物,但是小丝束织物的材料和编织成本都较高。各种织物中,PBO 织物具有最高的承载效率,因此有助于降低蒙皮材料的面密度,也增加了在蒙皮材料设计时对结构参数进行进一步调整的余地。

### 2.2 高性能蒙皮材料结构与力学性能关系

#### 2.2.1 拉伸性能测试

综合考虑高性能蒙皮材料的各项性能要求和面密度的限制,对蒙皮材料各功能层进行设计,如表 3 所示,蒙皮材料面密度为 178g · cm<sup>-2</sup>。按照表 3 所示结构设计制备了多层复合结构蒙皮材料,对其拉伸性能

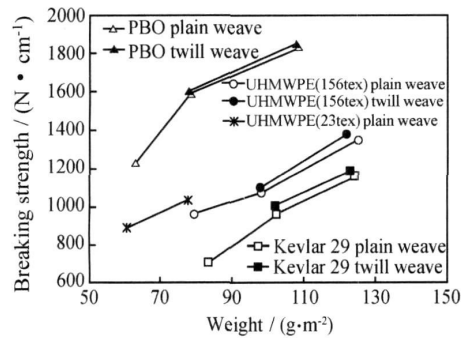


图1 不同结构形式高性能纤维织物的断裂强力与面密度的关系

Fig.1 Breaking strength of high performance fabrics with different structural characteristics vs weight

进行测试,同时参照蒙皮材料测试标准测试了 PVF/PET 复合薄膜的拉伸性能,结果如表 4 所示,由表 4 可以看出,蒙皮材料纬向(Fill)的断裂强力低于经向(Warp)的断裂强力,同时纬向的断裂伸长率略高于经向,另外,与 PBO 纤维织物及其制备的蒙皮材料相比,PVF/PET 复合薄膜的拉伸性能较低,拉伸断裂强力仅为  $87.2\text{N}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,且实验过程中当其伸长率达到蒙皮材料的断裂伸长率 4% 时,强力载荷仅为  $40\text{N}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,对蒙皮材料断裂强力的贡献非常小,因此,蒙皮材料的断裂强力主要来自于织物增强体的贡献。

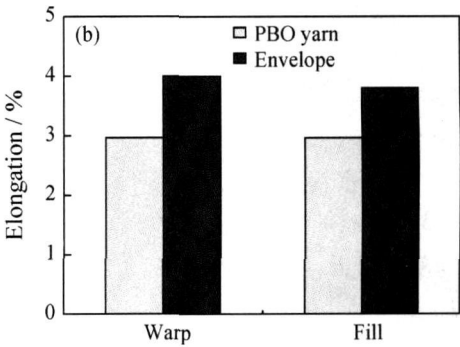
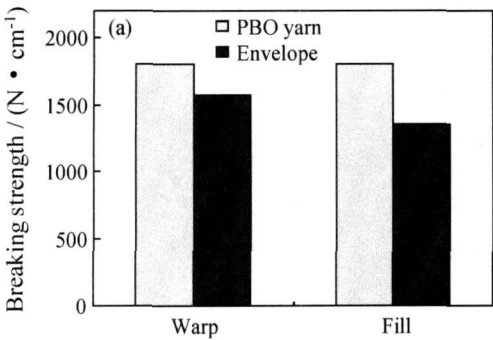


图2 PBO 纱线与蒙皮材料的拉伸性能 (a) 断裂强力; (b) 断裂伸长率

Fig.2 Tensile properties of PBO yarn and envelope material (a) breaking strength; (b) elongation

蒙皮材料的载荷-位移曲线如图 3 所示,可以看到,在纬向断裂强力的测试中,曲线从最高点下降后又出现多次转折,说明纬向织物断裂破坏时纱线不同时断裂,最高点对应的断裂强力测试值较低;而经向的载荷-位移曲线从最高点下降后应力直线下降,曲线最高点对应的断裂强力测试值较高,说明在经向断裂强力的测试中,纱线基本同时断裂。分析认为,经过纱线编织和织物与薄膜复合等工艺后,蒙皮材料中不同的纱

表 3 蒙皮材料各功能层及其面密度

Table 3 The function components and weight of envelope material

Function component	Material	Weight/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )
Load bearing layer	PBO plain weave	78
Gas holding layer	PET film	40
Environmental layer	PVF film	30
Adhesive	Polyurethane	30

表 4 蒙皮材料和 PVF/PET 复合薄膜拉伸性能

Table 4 Tensile properties of envelope material and PVF/PET laminated film

Property	Envelope material		PVF/PET laminated film
	Warp	Fill	
Breaking strength/( $\text{N}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	1578	1356	87.2
Elongation/%	4.0	3.8	90.7

为了考察蒙皮材料制备过程对力学性能的影响,对其从 PBO 纱线编织成平纹织物到与薄膜复合得到蒙皮材料的制备过程中表观拉伸性能的变化进行了分析。按照 PBO 织物的面密度计算,假定织物中每一根纱线的强力都完全转化为织物的强力,然后将其与蒙皮材料实际测试的断裂强力和断裂伸长率进行比较,结果如图 2 所示,由图 2 可以看到,蒙皮材料的经、纬向断裂强力与纱线相比出现了不同程度的降低,经向强力保留 87.7%,纬向强力保留 77.8%,同时两个方向的断裂伸长率都比纱线要高。

线准直度不尽相同,使得测试时纱线不同时断裂,导致蒙皮材料与纱线相比断裂强力降低,伸长率增加,而工艺过程中由于纬向纱线的伸展程度不如经向纱线,导致纬向性能降低更多。因此蒙皮材料制备过程中需要控制工艺条件,提高其结构均匀性,使不同的经、纬纱的张力尽可能一致,才有利于获得较高的断裂强力。

2.2.2 撕裂性能

撕裂破坏是飞艇蒙皮的一个主要破坏方式,蒙皮

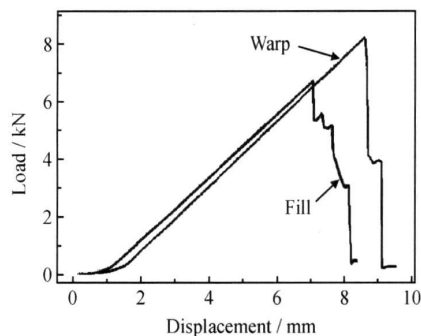


图3 蒙皮材料载荷-位移曲线

Fig. 3 Load displacement curve of envelope material

材料的抗撕裂和撕裂扩展性能代表了蒙皮材料损伤后抑制损伤继续扩展的能力,亦即蒙皮材料的损伤容限,研究中为了考察不同织物结构形式对蒙皮材料撕破强度的影响,分别选择 PBO 纤维和不同细度 UHMWPE 纤维编织成具有相同面密度的平纹结构增强织物,然后与同样的 PET 和 PVF 薄膜复合为蒙皮材料,测试其梯形试样撕破强度,结果如表 5 所示。

表5 蒙皮材料的撕破强度

Table 5 Tearing strength of envelope material

No	Fabric	Linear density of yarn/ tex	Weight/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Tearing strength/ N
E-1 <sup>#</sup>	PBO	110	78.4	569.8
E-2 <sup>#</sup>	UHMWPE	23	77.5	304.7
E-3 <sup>#</sup>	UHMWPE	156	79.4	616.5

由表 5 可知,不同织物的撕破强度呈现出与蒙皮材料的拉伸性能不同的规律。这是由于撕破行为与织物的拉伸断裂行为有密切关系,但又具有明显不同的特征,拉伸断裂时织物中同一方向的纱线基本上同时受力,在较短时间内受力方向上全部或大部分纱线断裂,而撕裂破坏时首先是最靠近裂口的一根纱线受力,与此同时,由于织物的变形和滑动,裂口根部的纱线逐渐靠拢,形成一个受力三角形,三角形中第一根纱线受到最大的拉力,当纱线的细度较大时,第一根纱线所能承受的拉力也较大,所以撕破强度与使用的纱线细度具有较大的关系,在受力三角形中的第一根纱线受力的同时,其他纱线也共同受力,直至第一根纱线断裂,然后这种破坏方式不断重复,织物发生撕破,因此织物的撕破强度要大于单根纱线的断裂强度,其值大小取决于受力三角形内的纱线数量和纱线的断裂伸长率,纱线的断裂伸长率越大,三角形内同时受力的纱线根数越多,撕破强度也就越大<sup>[9]</sup>。撕裂过程中增强材料的这种破坏机制,导致制备的蒙皮材料撕破强度相应

出现了较大的差异,E-1<sup>#</sup>,E-2<sup>#</sup>,E-3<sup>#</sup>蒙皮材料使用的原材料分别为 110tex 的 PBO 纱线,23tex 的 UHMWPE 纱线,156tex 的 UHMWPE 纱线,通过计算可求得单纱断裂强度理论值分别为 407, 73.6, 499N,所以 E-1<sup>#</sup>蒙皮材料的撕破强度大于 E-2<sup>#</sup>蒙皮材料,但小于 E-3<sup>#</sup>蒙皮材料。

以上测试结果说明,与蒙皮材料的拉伸断裂性能相比,撕破强度与纱线本身的拉伸断裂性能关系更大。图 4 为蒙皮材料撕破强度与采用的纤维纱线断裂强度的比较结果,可以看到,相同面密度时,当 PBO 和 UHMWPE 的纱线细度分别为 110tex 和 156tex 时,蒙皮材料的撕破强度分别为单束纱线断裂强度的 1.4 倍和 1.2 倍,当 UHMWPE 的纱线细度为 23tex 时,蒙皮材料的撕破强度为单束纱线断裂强度的 4.1 倍,可见纱线细度降低时,由于同时受力纱线的数量增加,蒙皮材料的撕破强度与单纱断裂强度相比增加的比例提高,但与纱线细度较大的织物相比,其撕破强度仍较低,因此,采用细度较大的增强织物有利于提高蒙皮材料的撕破强度。

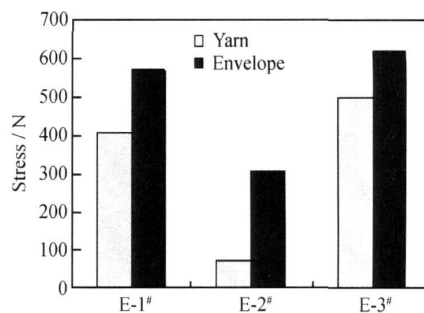


图4 蒙皮材料撕破强度与纱线断裂强度的比较

Fig. 4 Comparison between tearing strength of envelope materials and breaking strength of yarns

### 3 结论

(1)在几种不同的高性能纤维织物中,PBO 纤维制备的增强织物具有较高的拉伸断裂性能,有利于提高蒙皮材料的断裂强度,降低蒙皮材料的面密度。

(2)蒙皮材料拉伸断裂性能主要来自增强纤维织物的贡献,主要取决于纤维种类和织物结构。制备蒙皮材料时保持增强织物中经、纬纱具有均匀的张力有助于提高其拉伸断裂性能。

(3)蒙皮材料的撕破强度除了与采用的纤维种类有关外,还与织物纱线的细度有较大关系,采用细度较大的增强织物有利于提高蒙皮材料的撕破强度。

(下转第 13 页)

## 4 结论

(1) 辊内的温度波可分为以轧辊转动一周为周期的高频波和以轧制一块带坯为周期的低频波。在表层附近, 高频温度波起主要作用, 温度波动极为剧烈, 但随着深度的增加迅速衰减, 影响深度仅为几个毫米。在轧辊内部热冲击较小, 低频温度波起主要作用, 但影响范围广, 温度波衰减缓慢, 影响深度约为 35~40 mm。

(2) 在轧辊的同一深度温度波动的幅度与咬入温度和轧制速度有关, 随轧制温度的增加而增大, 随轧制速度的增加而减小, 且轧制参数对高频温度波的影响远大于对低频温度波的影响。

(3) 计算结果表明, 为了消除低频温度波对高速钢复合轧辊双金属复合界面结合质量的影响, 工作层应当有足够的厚度。

### 参考文献

- [1] SHIMIZU M, SHITAMURA O. Development of high performance new composite roll [J]. ISIJ International, 1992, 32(11): 1244–1249.
- [2] 冯明杰, 王恩刚, 王俊刚, 等. 高速钢复合轧辊及其热处理[J]. 中国冶金, 2006, 16(10): 14–19.
- [3] ICHINO K, KATAAOKA Y, KOSEKI T. Development of centrifugal cast roll with high wear resistance for finishing stands of hot strip mill [J]. Kawasaki Steel Technical Report, 1997, 37(8): 13–18.
- [4] 刘海峰, 刘耀辉. 高速钢复合轧辊的研究现状及进展[J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(5): 67–70.
- [5] DEVADAS C, SAMARASEKARA V. Heat transfer during hot

rolling of steel strip[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1986, 13(6): 311–321.

- [6] SERAJZADEH S, KARIMI T A, MUCCIARDI F. Unsteady state workroll temperature distribution during continuous hot slab rolling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(12): 2447–2462.
- [7] FISHER F D. The temperature and stress fields developing in rolls during hot rolling [J]. Journal of Materials Processing and Technology, 2004, 150(3): 263–269.
- [8] 杨利坡, 刘宏民, 彭艳, 等. 热连轧轧辊瞬态温度场研究[J]. 钢铁, 2005, 40(10): 38–41.
- [9] 包仲南, 陈先霖, 张清东. 带钢热连轧机工作辊瞬态温度场的有限元仿真[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(1): 60–63.
- [10] 高建红, 黄传清, 王敏, 等. 基于 ANSYS 的热轧工作辊温度场的有限元分析[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(3): 218–221.
- [11] AHMAD S, MOHAMMADA A. Changing the geometry of water spray on milling work roll and its effect on work roll temperature [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(1): 35–49.
- [12] 冯明杰, 王恩刚, 赫冀成. 带钢热连轧机工作辊非稳态传热的数值模拟[J]. 金属学报, 2010, 46(8): 1009–1017.
- [13] 王厚华, 周根明, 李新禹. 传热学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006. 71–75.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2003AA331050); 国家自然科学基金资助项目(200809123)

收稿日期: 2009-10-22; 修订日期: 2010-06-17

作者简介: 冯明杰(1971—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 高速钢复合轧辊的制备及应用, 联系地址: 辽宁省沈阳市东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室(110819), E-mail: fengmj@epm.neu.edu.cn

(上接第4页)

### 参考文献

- [1] 王彦广, 李健全, 李勇, 等. 近空间飞行器的特点及其应用前景[J]. 航天器工程, 2007, 16(1): 50–57.
- [2] JAMISON L, SOMMER G S, PORCHE I R. High altitude airships for the future force army [R]. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2005.
- [3] LUKE BROOKE. High altitude LTA platforms: capabilities and possibilities[A]. AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO) [C]. Arlington, Virginia: AIAA, 2005.
- [4] FAA-P-8110-2, Airship design criteria[S].
- [5] KOMATSU KEIJI, SANO MASA-AKI, KAKUTA YOSHIAKI. Development of high specific strength envelope materials [A]. AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Tech [C]. Denver, Colorado: AIAA, 2003.

[6] 顾正铭. 平流层飞艇蒙皮材料的研究[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(1): 62–66.

[7] ZHAI Hong-lian, RULER ANTHONY. Material challenges for lighter than air systems in high altitude applications [A]. AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference [C]. Arlington, Virginia: AIAA, 2005.

[8] LACHENMEIER K S, MURAI K. Development of three dimensional reinforced membrane technology for high performance balloon and inflatable applications[J]. Advances in Space Research, 2004, (33): 1732–1735.

[9] 姚穆. 纺织材料学[M]. 北京: 中国纺织出版社, 1996. 535–537.

收稿日期: 2009-12-25; 修订日期: 2010-08-14

作者简介: 李斌太(1974—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 现从事复合材料研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 12 分箱(100095), E-mail: bintaili@sohu.com