

超距间隔织物及其复合材料应用研究进展

赵颖, 姜亚明

(天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387)

摘要: 对目前国内外超距间隔织物及其复合材料的研究和应用进行综述。首先简要介绍传统间隔织物和超距间隔织物的结构特点, 并结合研究现状着重对针织和梭织结构超距间隔织物的优缺点及研究方向进行概括。然后, 在此基础上列举超距间隔织物复合材料在家居、体育娱乐和交通建筑等领域的应用。最后, 总结和展望了超距间隔织物复合材料在防护、保温、建筑和交通运输产业应用的优势, 以期在更多领域深入扩大应用。

关键词: 间隔织物; 超距; 织造技术; 复合材料; 力学性能; 发展趋势

中图分类号: TB 383

文献标志码: B

文章编号: 1000-4033(2025)03-0078-06

Research Progress in the Application of Super-gauge Spacer Fabrics and Its Composites

Zhao Ying, Jiang Yaming

(School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To promote the efficient, diversified and sustainable development of industrial textiles, the research and application of the super-gauge spacer fabrics and its composite materials at home and abroad are reviewed. Firstly, the structural characteristics of traditional spacer fabrics and super-gauge spacer fabrics are briefly introduced, and the advantages, disadvantages and research directions of knitted and woven super-gauge spacer fabrics are summarized based on the current research status. Then, on this basis, the applications of super-gauge spacer fabric composites in the fields of furniture, sports, entertainment, transportation and construction are listed. Finally, this paper summarizes and prospects the advantages of the application of super-gauge spacer fabric composites in the protection, thermal insulation, construction, and transportation industries, presenting a view to further expanding the application in more fields.

Key words: Spacer Fabric; Super-gauge; Knitting Technology; Composite Materials; Mechanical Properties; Development Trend

超距间隔织物是由上、下两层和连接两面层的间隔丝组成的一种三维立体结构织物, 其隔距在 50.0 mm 以上。根据上、下两表面层的织造工艺不同, 分为超距经编间隔织物和超距梭织间隔织物, 根据间隔丝长度变化, 分为定隔距间隔织物和变隔距间隔织物, 不同种类间隔织物可满足不同应用需求。超距间隔织物作为复合材料增强体

可制作成充气材料和泡沫填充材料, 因超距间隔织物特殊的三维立体结构和优异性能, 使其增强的充气复合材料逐渐取代普通充气材料, 成为纺织领域相对较新的一个发展方向。不同用途的超距间隔织物充气材料对产品厚度、纱线品种及性能、织造技术和涂层原料及工艺等的要求都有所不同^[1-3]。本文对超距间隔织物的分类和织造技

术进行探讨, 分析不同种类超距间隔织物在结构和性能上的差异, 对超距间隔织物增强复合材料的力学性能和应用研究进行总结, 最后对目前研究中存在问题及未来更广泛的研究和应用方向进行展望。

1 间隔织物概述

1.1 传统间隔织物

传统间隔织物是一种具有三维空间结构的织物, 由上、下两表

作者简介: 赵颖(1997—), 女, 硕士研究生。主要从事超距间隔织物充气复合材料的性能研究。

通讯作者: 姜亚明(1970—), 男, 教授。E-mail: jiangyaming@tiangong.edu.cn。

面层和连接上、下两表面层的间隔丝组成,隔距一般在 0.3~50.0 mm。间隔丝按一定的规律贯穿上、下两层面,因上、下两层面之间的距离小,故间隔丝主要起支撑作用^[4]。

传统的经编间隔织物如图 1 所示,经编间隔织物的隔距主要由针床上脱圈板之间的距离、织物的组织结构、后整理工艺等控制。上、下两表面层可根据功能或款式需求编织成不同的组织结构,例如纬平针组织、罗纹组织、贾卡组织等^[5-6];编织上、下两表面层的纱线一般选择耐磨性能较好的化纤长丝,例如涤纶、丙纶等;间隔丝可根据需求选择不同功能的纤维原料,具有较强抗弯刚度的玻璃纤维可起支撑作用,柔性好的涤纶、锦纶等起连接作用。传统经编间隔织物中间的间隔层可提供足够的空气流通空间,具有良好的透气、透水、抗压、回弹性等特性^[7-8],可代替海绵广泛用于鞋材、床垫、坐垫等,具有易洗快干、可回收利用等优点^[9-11]。

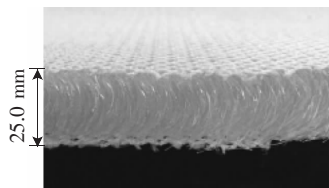


图 1 传统经编间隔织物

传统针织间隔织物虽然形式多样,可成形性比梭织织物好,但针织织物的纱线运动较弯曲复杂,要求纤维具有一定的弯曲性能,限制了刚度较大的高性能纤维用于针织间隔织物中,例如玻璃纤维、碳纤维等具有高模量和高强度,但不易弯曲、容易脆断^[12]。此外,弯曲运动容易损伤纤维,使纤维无法发挥最大化作用。梭织织物在织造过程中是通过控制综框的升降和打纬实现经纬纱交织,纱线没有过多的卷曲、分布较为匀直^[13]。因此,梭

织织造方式相对于针织织造方式,对纤维材料的损伤较小、性能利用率较高,织物具有更强的抗拉伸、抗压缩、抗顶破、抗冲击等性能^[14-15]。目前三维梭织间隔织物主要用作复合材料的增强体,用于建筑土工布、墙板等方面。

1.2 超距间隔织物

根据间隔织物厚度,可分为传统间隔织物和超距间隔织物;根据间隔丝长度变化,分为定隔距间隔织物和变隔距间隔织物。超距间隔织物厚度一般在 50 mm 以上,通常为 150~300 mm,最大可达 700 mm 左右,可满足更大的厚度范围^[4]。超距间隔织物由于隔距较大,间隔丝难以起到支撑作用,通常使用化纤长丝作为间隔丝,起连接上、下表面的作用^[16]。超距间隔织物根据织造方式不同,分为超距经编间隔织物和超距梭织间隔织物,超距经编间隔织物由改造后的双针床经编机编织而成,超距梭织间隔织物由改造后的双剑杆织机编织而成。超距间隔织物多经 PVC、TPU 等高分子材料涂层后制备成充气结构材料用作充气床垫、充气皮艇、急救浮桥^[16]等,间隔丝起到连接作用,使材料充气后具有一定形状和强力。

1.2.1 超距经编间隔织物

超距经编间隔织物厚度一般在 50 mm 以上,上、下表面呈现经编针织物的特性,如图 2 所示,由改造后的双针床经编机编织而成。超距经编间隔织物隔距主要由编织过程中间隔丝的送经量控制^[4],可调范围大,根据不同的性能要求可以编织不同隔距的超距经编间隔织物,最高可达 700.0 mm。由于超距经编间隔织物的隔距较大,无法只靠间隔丝达到支撑抗压的效果,通常对上、下表层进行涂层后与高分子聚氯乙烯或聚四氟乙

等膜材料包覆黏接制备成充气结构材料,因此其上、下表面一般采用纬平针结构,以保证与涂层的良好黏结性。间隔丝一般采用高强柔性化纤长丝,以便于折叠或卷绕收纳,间隔丝密度过小会使间隔层强度不够,无法很好连接上、下表层,间隔丝密度过大会浪费原料,因此间隔丝密度还需要根据具体情况来决定。

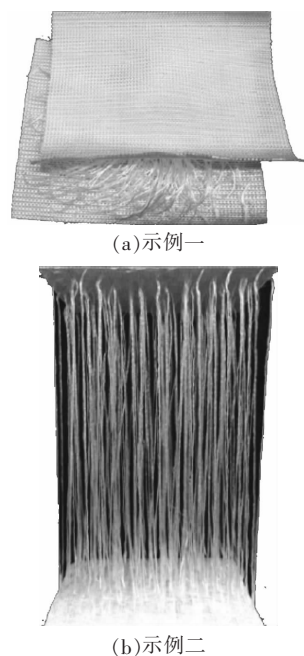


图 2 超距经编间隔织物张拉前后形态

1.2.2 超距梭织间隔织物

由于编织超距经编间隔织物,纱线经历的运动形式多,容易对纤维原料造成一定弯曲损伤,影响纤维材料发挥最大的潜能^[13],因此通过改造双剑杆织机,设计开发出超距梭织间隔织物。超距梭织间隔织物上、下表面呈现梭织特性,主要通过调整织物组织结构和改造后双剑杆织机上的定高片来调整隔距,隔距通常在 50.0~300.0 mm。与超距经编间隔织物相同,因为隔距较大,超距梭织间隔织物无法只靠间隔丝达到支撑抗压的效果,需要对上、下表面进行涂层,制成复合材料后与高分子聚氯乙烯或聚

四氟乙烯等膜材料包覆黏接制备成充气结构材料,因此上、下表面一般采用平纹组织,以保证与涂层有良好的黏结性。

超距经编间隔织物上、下表面呈现针织物特性,针织物由于是线圈勾结而成,涂层会深入到织物中。超距梭织间隔织物上、下表面呈现梭织物的特性,表面平整,涂层很难渗入到织物中。因此,超距针织间隔织物与涂层结合更加牢固,剥离强度更大,但整体受拉伸应力时,超距经编间隔织物上、下表面更易变形,使涂层遭受破坏,而超距梭织间隔织物结构稳定、不易变形,涂层不易受织物拉伸变形破坏。

1.2.3 定隔距间隔织物

定隔距间隔织物是指在上、下两层水平平行且中间间隔丝长度相等的间隔织物。定隔距间隔织物经与涂层复合形成充气结构材料,充气后上、下两表面呈平行状态,形状稳定,主要用于板材。

1.2.4 变隔距间隔织物

变隔距间隔织物是指上、下两层不平行且中间间隔丝长度不相等的间隔织物。变隔距间隔织物与涂层复合形成充气结构材料,充气后可根据实际需求形成不同形状和厚度,在建筑上可用于制作不等厚度的渐变式桥梁结构材料,也可用于制作风力发电叶片、无人机机翼等。

马丕波等^[17]发明了一种超距变隔距经编间隔织物的制备方法,采用圈结纱作为经编间隔织物中的间隔纱,编织成经编间隔织物后,水洗、干燥即可得到超距变隔距经编间隔织物,其制造工艺简单,所制成品厚度调节范围大。

马丕波等^[18]设计了一种由变隔距间隔织物制作的柔性充气式风力发电叶片,变隔距间隔织物

上、下两层之间的间隔丝长度与风力发电叶片各部位厚度一致,间隔丝伸直状态下呈现形状为风力发电叶片的形状。

2 超距间隔织物织造技术

2.1 纤维原料

传统梭织间隔织物常用作复合材料的增强体,因此会选择一些高性能纤维进行织造,例如玻璃纤维、碳纤维、玄武岩纤维等。而在超距间隔织物中,间隔丝一般只起到连接上、下表面作用,常选择化纤长丝作为间隔纱,以满足其可按需伸展的柔软特性。不同纤维原料对织造工艺有不同要求,间隔织物主要由针织和梭织两种工艺织造而成。

2.2 针织技术

郭威东等^[19]根据超距经编间隔织物特点,分析 RD6N 型双针床经编机主要工作机构,改造成圈机构、送经张力补偿机构等,探讨间隔梳摆动动程,使此经编机可以织造出大于传统间隔织物隔距的厚度为 100 mm 的超距间隔织物。

杨瞳^[20]在有 6 把梳栉的 RD6-EL 型大隔距双针床拉舍尔经编机

上编织隔距分别为 80.0、100.0、150.0 mm 的超距经编间隔织物,对经编机双针床电子送经系统和张力系统进行改进,并搭配 762 mm (30") 的盘头和江南大学经编集成控制系统,以满足织造超距间隔织物所需经纱张力和间隔丝经轴储纱量,如图 3 所示^[20]。

2.3 梭织技术

三维梭织间隔织物可在改造后的剑杆织机上生产,生产效率高,且容易实现产业化。目前用于织造超距梭织间隔织物的织机如图 4 所示。

韩斌斌等^[21]对传统织机的开口机构、引纬机构及打纬机构进行改造,开口机构中采用多页综框方式,引纬机构采用多剑杆刚性引纬方式,打纬机构采用长箱座脚的六连杆机构,实现梭织间隔织物的织制,但织机运动配合复杂,纱线间交织摩擦大,易损伤纤维原料。

黄锦波等^[22]提出一种梭织三维间隔织物具体实现方案以及生产工艺,在设备上提出双梭口结构设计,综框采用单综双组综丝方案

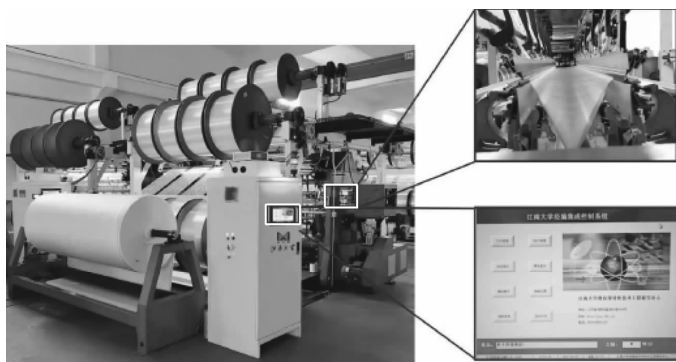


图 3 大隔距双针床经编机

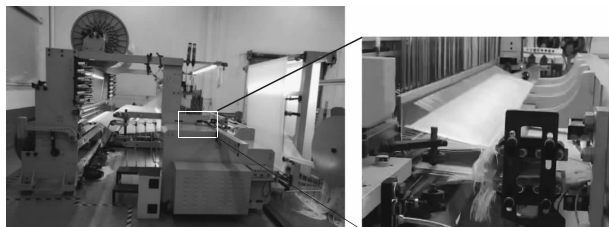


图 4 织制超距梭织间隔织物的双剑杆织机

满足多组经纱穿综需求,结合上机工艺可实现纵向经线交织高度调节,在实际生产中可减少经纱间摩擦及毛羽纠缠造成的影响。

3 超距间隔织物复合材料性能研究

单独使用超距间隔织物无法充分发挥其优良特性,可将其制作成超距间隔织物复合材料,用于家居、运动娱乐、交通建筑及军事国防等领域,是制作气垫床、冲浪板、急救浮桥、帐篷、充气救生艇等的理想材料。

超距间隔织物经清洗后,上、下表面与柔性聚氯乙烯(PVC)经压延工艺复合在一起,经上、下表面涂层后的超距间隔织物复合材料裁剪成一定形状后使用PVC膜材对四周进行包覆、密封,充气后得到超距间隔织物充气材料。

Wielgosz et al^[23]研究间隔织物增强充气板材在高压充气条件下(50、300 kPa)的弯曲性能,结果表明,充气结构不能视作普通的板或者梁,因为他们的变形模式不同,这主要取决于施加的负载、充气压力和织物本构结构,因此提出一种新的充气板理论,褶皱载荷由平衡方程推导,充气板的弯曲挠度是面层和间隔丝共同决定的。

高志增^[24]研究了间隔织物增强充气板在不同内压力下的三点弯曲性能,在Anasys中建立了静态载荷分析模型,并与试验结果进行比较验证。研究发现,内压力是影响其承载能力的主要因素,与有限元结果相比发现,不同内压力下的褶皱载荷差值为6.2%~9.1%。使用挠度公式计算发现,此材料的等效剪切模量主要受内部压力影响,充气板厚度和膜材厚度影响可忽略不计,如图5所示^[24]。

喻颖等^[25]研究超距经编间隔



图5 间隔织物增强充气板的三点弯曲测试

织物增强充气板不同内部气压下的压缩性能,分析试验数据和材料的破坏过程,得出超大隔距柔性复合材料的压缩性能随内部气压强度的增加而增强,如图6所示^[25]。



图6 超大隔距经编柔性复合材料的压缩测试

Dauids et al^[26]提出一种新的非线性梁有限元建模方法,用于预测间隔织物增强充气板材在弯曲载荷下的载荷-挠度行为,将预测与试验结果对比,表明该模型能以合理精度预测起皱前和起皱后的板弯曲行为。

Sun et al^[27]设计并制备一种由泡沫填充大隔距经编间隔结构织

物的复合材料,其冲击试验结果表明,复合材料以明显压缩变形消散冲击能量,且填充泡沫密度与材料抗低速冲击性能呈反比关系,低密度复合材料可吸收更多冲击能量。

杨瞳等^[20,28]测试不同厚度和内部气压的大隔距经编间隔结构充气膜材料在不同冲击能量下的抗低速冲击性能,使用有限元软件建立低速冲击模型,与试验结果相比,分析大隔距经编间隔结构充气膜材料在低速冲击下的形变过程及应力分布情况。结果表明,充气结构自身形变是大隔距经编间隔结构充气膜材料抵抗冲击载荷变化的重要作用机理,通过冲击过程中的极大形变来抵抗外力破坏,材料厚度对冲击峰值载荷的影响不大,但厚度和内部气压是影响应力波在充气膜结构中传播和消散的重要因素,如图7所示。

4 超距间隔织物复合材料的应用

4.1 家居用品

超距间隔织物充气复合材料结构稳定、厚度调节范围广、质量轻、可循环使用,可用作充气床垫(图8a)、沙发(图8b)等。这类家居用品可以通过调节内部气压的大小改变软硬程度,内部间隔丝多点支撑可分散压力,稳固,不易下陷变形,人体与材料百分百贴合使人

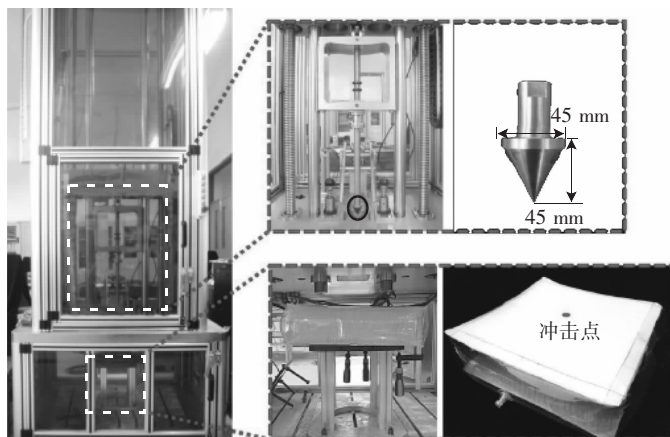


图7 大隔距经编间隔结构充气材料的低速冲击

体各部位均匀受力、体感舒适、方便收纳,还可定制尺寸用于汽车(图 8c),上下表面的涂层还具有防潮、耐腐蚀等功能。



(a) 充气床垫



(b) 充气沙发



(c) 汽车床垫

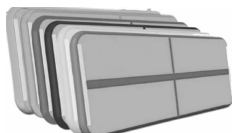
图 8 超距间隔织物充气复合材料家居制品

4.2 运动娱乐用品

超距间隔织物充气复合材料因具有良好的抗压缓冲性能,可以应用在运动娱乐方面,例如体操垫、冲浪板、钓台、游泳池等,如图 9 所示。充气体操垫可以减少使用者与地面的碰撞,吸收人体运动带来的冲击力,起到缓冲保护人体的作用。超距间隔织物充气材料制作的冲浪板放气易收纳、充气可一次成形、质量轻、表面涂层防水耐腐蚀。超距间隔充气材料制作的游泳池质量轻,不用时也可放气折叠收纳,随时随地充气便可形成一个泳池,且易清洗。

4.3 交通建筑用品

因超距间隔织物充气复合材料具有易于充气、便于携带、质量轻、防水、耐腐蚀、具有稳固的三维立体结构等优点,其在交通建筑领



(a) 体操垫



(b) 冲浪板



(c) 游泳池

图 9 超距间隔织物充气复合材料运动娱乐用品

域前景广阔,如充气船、急救浮桥、救护缓冲垫、观景台、无支架帐篷等,如图 10 所示。充气船和急救浮桥在遇到紧急情况时可充气迅速成形,用于水面急救。浮于水面的移动观景台不仅外形美观,而且可拆卸重复使用。无支架帐篷在户外露营时,充气可迅速成形,节省时间和人力,且质量轻、不用时也可放气折叠收纳。

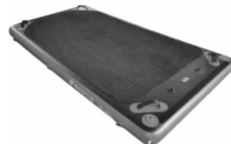
5 结束语

因超距间隔织物具有特殊的结构和良好的力学性能,其被应用于家居、运动娱乐、交通建筑等领域。目前,对超距间隔织物的研究主要在针织超距间隔织物增强复合材料上,且以弯曲、压缩、抗冲击等力学性能为主,但测试压缩性能时采用全压,忽略了实际情况中局部压缩间隔丝对整体材料的作用。针织超距间隔织物上、下表面层线圈结构显然没有梭织超距间隔织物上、下面层的平纹结构稳定,在受到拉伸变形时,针织结构易产生大变形而破坏涂层与上、下表面的复合,因此超距间隔织物复合材料的研究和应用空间还很大,在后续研究上可以从以下几个方面开展。

a. 防护材料:目前的防护材料多由织物增强树脂复合材料制



(a) 皮划艇



(b) 救生艇



(c) 观景台



(d) 充气帐篷

图 10 超距间隔织物充气复合材料户外用品

作而成,当受到局部冲击时,复合材料局部受损严重,而其他区域几乎完好无损,大大降低了材料的使用率。超距间隔织物充气材料特殊的三明治充气结构,使得当材料受到局部作用力时,内部空气压缩,压强增大,内部空气将作用力瞬间分散到了材料各个部位,而间隔丝的存在牵制了材料形变,间隔丝便受到了拉力,因此局部作用力被瞬间分散成了数百根间隔丝的拉力,使材料利用率大大提升。

b. 保温材料:现有保温材料多为棉被、泡沫等厚重且不易收纳的材料。超距间隔织物充气复合材料具有质量轻、易装配和收纳、可循环利用、成本低等优点,上、下表面涂层具有防水、耐腐蚀、不易老化等优点,向材料内部充入不同气体,利用温室气体吸收热能的原

理,使材料具有升温、保温性能,可作为一种新型保温材料使用。

c. 建筑材料:质轻、易装配、隔音效果好是未来建筑发展的重要方向,超距间隔织物充气复合材料具有质量轻、充气一次成形、易于装配和收纳且强度高优点,可将其运用到装配式建筑上,超距间隔织物充气材料内部具有间隔丝和空气层,通过振动等方式吸收声波,可减少空间内声音反射。在遇到地震、洪水等紧急灾难时,其抗冲击缓冲性能和充气质量轻的优点还可用来保护人体及逃生使用。变隔距间隔织物填充泡沫或树脂可制作成复合材料用于桥梁等渐变式厚度结构。

d. 造船、飞机用材料:造船和飞机用材料的要求是质量轻且强度大,变隔距间隔织物充气材料具有厚度可调节、质量轻、强度大、成本低等优点,可制作成飞机、无人机、飞行器的机翼,还可作为船体材料的中间层,减轻整体材料的质量,充气材料使船体更易浮在海面上,不易因材料太重造成沉船危险。

参考文献

[1] LIU Y, HU H, LONG H, et al. Impact compressive behavior of warp-knitted spacer fabrics for protective applications[J]. Textile Research Journal, 2012, 82(8): 773-788.
[2] HOSUR M V, ABDULLAH M, JEE-LANI S. Manufacturing and low-velocity impact characterization of hollow integrated core sandwich composites with hybrid face sheets[J]. Composite Structures, 2004, 65(1): 103-115.
[3] PALANI R T, RAMAKRISHNAN G, KANDHAVADIVU P. Permeability and impact properties of warp-knitted spacer fabrics for protective application[J]. The Journal of the Textile Institute, 2016, 107(9): 1079-1088.

[4] 张晓会, 杨瞳, 马丕波. 基于 3D 打印的竹节结构中空单丝制备及其压缩性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(12): 32-38.
[5] 钟萍. 高性能纱线三维间隔织物织造印染技术的开发[J]. 染整技术, 2018, 40(12): 46-47.
[6] 李欣欣, 蒋高明, 张爱军, 等. 经编提花间隔织物的计算机辅助设计[J]. 纺织学报, 2015, 36(2): 105-110.
[7] 陈晴, 张家琳, 范丽敏. 经编间隔织物的透气性与透湿性[J]. 服装学报, 2017, 2(2): 107-112.
[8] 龚小舟, 李保军, 郭依伦. 间隔织物对防弹衣热舒适性能改善的研究[J]. 服饰导刊, 2013, 2(4): 66-69.
[9] 李超, 孙婉, 贾西苑, 等. 经编间隔织物的应用及其发展[J]. 产业用纺织品, 2016, 34(5): 31-33.
[10] 陈燕, 张永革, 陈春侠. 经编间隔织物在隔尿垫中的应用及性能测试[J]. 山东纺织科技, 2015, 56(1): 51-53.
[11] 陈晓东. 文胸用经编间隔织物产品的设计开发[J]. 现代纺织技术, 2013, 21(1): 20-22.
[12] 马亚运, 高晓平. 三维正交机织物织造及复合材料成形工艺研究[J]. 产业用纺织, 2016, 34(8): 26-30.
[13] 张明俊. 三维机织间隔复合材料的开发和性能结构的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2006.
[14] MAHLAGHA S, AZITA A, NAZANIN E, et al. Investigation of the bending behaviour of woven spacer fabrics[J]. Annals of the University of Oradea: Fascicle of Textiles, Leatherwork, 2020, 21(1): 65-70.
[15] 张曼宁, 钟智丽, 万佳, 等. 双层机织间隔纱织物增强复合材料板的冲击后压缩强度分析[J]. 纺织科学与工程学报, 2020, 37(1): 12-16.
[16] 徐云龙, 夏凤林. 超大隔距经编间隔织物的生产工艺与应用[J]. 纺织导报, 2018(4): 75-77.
[17] 马丕波, 杨瞳, 蒋高明, 等. 一种超大隔距经编间隔织物的制备方法: 中国, 202011166913.2[P]. 2021-01-26.

[18] 马丕波, 徐婉丽, 蒋高明, 等. 一种柔性充气式风力发电叶片及其制备方法: 中国, 202010599498.3[P]. 2020-09-22.
[19] 郭威东, 夏凤林. 双针床超大隔距经编间隔织物生产实践[J]. 针织工业, 2019(4): 20-23.
[20] 杨瞳. 大隔距经编间隔结构充气膜材料制备及其低速冲击加载性能[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
[21] 韩斌斌, 王益轩. 三维间隔机织物的设计及织机开发[J]. 产业用纺织品, 2015(6): 6-11.
[22] 黄锦波, 祝成炎, 张红霞, 等. 基于剑杆织机改造的三维间隔机织物工艺设计[J]. 纺织学报, 2021, 30(2): 5-8.
[23] WIELGOSZ C, THOMAS J C. Deflections of inflatable fabric panels at high pressure[J]. Thin-walled Structures, 2002, 40(6): 523-536.
[24] 高志增. 直拉丝空间布充气板受力性能分析研究及应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
[25] 喻颖, 张超, 马丕波. 超大隔距经编间隔柔性复合材料制备与压缩性能研究[J]. 产业用纺织品, 2017, 35(3): 28-31.
[26] DAVIDS W G, WAUGH E, VEL S. Experimental and computational assessment of the bending behavior of inflatable drop-stitch fabric panels[J]. Thin-walled Structures, 2021, 167: 108178.
[27] SUN Y, LU L, YAN B, et al. Preparation and characterization of 3D flexible high-distance spacer fabric/foam composite[J]. Composite Structures, 2021, 261: 113549.
[28] YANG T, LUO M, ZOU Z, et al. Mechanical properties of the surface membrane of lattice spacer-fabric flexible inflatable composites [J]. Textile Research Journal, 2022, 92(7-8): 1088-1097.

收稿日期 2024年5月8日