

气流冲击下的紧密织物动态透气性能分析

韩晓果¹, 贾明皓¹, 周红涛^{1,2}, 肖学良^{*1}, 钱坤¹

(1. 江南大学生态纺织教育部重点实验室, 江苏无锡 214122; 2. 盐城工业职业技术学院纺织服装学院, 江苏盐城 224005)

摘要: 为了指导设计防护性产品, 依据其防护过程探索织物在动态高压下的渗透性变化机理, 根据理想气体方程建立渗透性数学模型。自行搭建织物渗透性实验平台, 对5种不同织物进行外界高压冲击。通过气压变化, 并结合渗透率模型, 最终得到织物在动态高压下的透气性变化规律。实验表明, 织物渗透率与织物密度密切相关。当织物密度较大时, 前期织物的渗透率逐渐下降, 但随着受力时间的延长, 织物渗透率呈明显增长趋势。

关键词: 紧密织物; 动态高压; 透气性; 数学模型; 理论研究

中图分类号: TS 101.8; TS 101.92.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2019)05-0377-06

Analysis on Dynamic Permeability of Tight Woven Fabrics Under Air Impact

HAN Xiaoguo¹, JIA Minghao¹, ZHOU Hongtao^{1,2}, XIAO Xueliang^{*1}, QIAN Kun¹

(1. Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. College of Textile and Clothing, Yancheng Vocational Institute of Industry Technology, Yancheng 224005, China)

Abstract: In order to guide the design of protective products, the mechanism of permeability change of fabrics under dynamic high pressure was explored according to the protective process. According to the ideal gas equation, the mathematical model of permeability was established. Five different fabrics were impacted by external high pressure through a self-built permeability test platform. Through the change of air pressure and permeability model, the permeability change rule of fabrics under dynamic high pressure was finally obtained. Experiments show that the permeability of fabrics is closely related to the density of fabrics. When the density of the fabrics is high, the permeability of the fabrics in the early stage decreases gradually, but with the extension of the stress time, the permeability of the fabrics shows a significant growth trend.

Key words: tight woven fabric, dynamic high pressure, permeability, mathematical model, theoretical study

紧密织物是许多保护性装置的重要组成部分, 可以使被保护体在遇到危险时得到良好的缓冲防护, 从而避免受到伤害或者减少受伤害的程度。常见的保护型装置如降落伞、车用安全气囊, 以及航天航空使用的软着陆缓冲气囊(可用于保护从空中向灾区投放的物资或由外空间降落到其他星球表面的探测车)。此外, 目前正处于测试阶段的老人

穿戴式安全气囊等也是采用相同原理^[1]。

气囊类保护型织物在工作时, 一般受高压气体作用影响, 需要在极短时间内打开折叠织物, 但其工作环境对织物的性能要求极高^[2], 织物应具有良好的弹性, 才可以保证在受到较大气流冲击力后能尽量恢复成初始状态^[3-4]。理论上可以利用不同的工作载荷, 通过控制织物的变形量, 从而达到控制

收稿日期: 2019-03-27; 修订日期: 2019-07-23。

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFB0303200); 江苏省自然科学基金项目(BK20160157); 江苏高校优势学科建设工程项目。

作者简介: 韩晓果(1992—), 女, 硕士研究生。

* 通信作者: 肖学良(1984—), 男, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向为智能纤维材料及其复合结构。

Email: xiao_xueliang@jiangnan.edu.cn

织物透气量大小的目的^[5]。除此之外,紧密织物作为多孔材料,其透气性能取决于材料本身孔隙的几何结构。在通过织物透气仪获取织物透气速率的条件下,可以利用达西定律得到实验材料的渗透值。由于纺织材料形成的交织结构比较柔软,所以在高压气流冲击下,其孔隙的几何结构势必会发生改变,从而对渗透性产生极大影响^[6],导致其保护效果的不稳定性增大。因此了解和掌握气流冲击作用下织物渗透性能的变化规律,对指导后期防护性织物结构设计具有重要意义^[7]。笔者前期已经探讨了织物在高气压下的面外变形^[8],文中实验着重对织物渗透性能进行研究。

表 1 织物规格参数
Tab.1 Specification parameters of fabrics

织物类型	织物结构	厚度/mm	经密(根/dm)	纬密(根/dm)	细度/tex		紧度/%
					经纱	纬纱	
C ₀	斜纹	0.35	220	210	42.7	42.7	80.6
C	斜纹	0.46	252	210	59.0	59.0	91.0
A	平纹	0.31	293	274	27.0	27.0	89.8
全弹	平纹	0.35	551	237	15.6	15.6	88.8
半弹	平纹	0.35	549	236	15.6	15.6	88.6

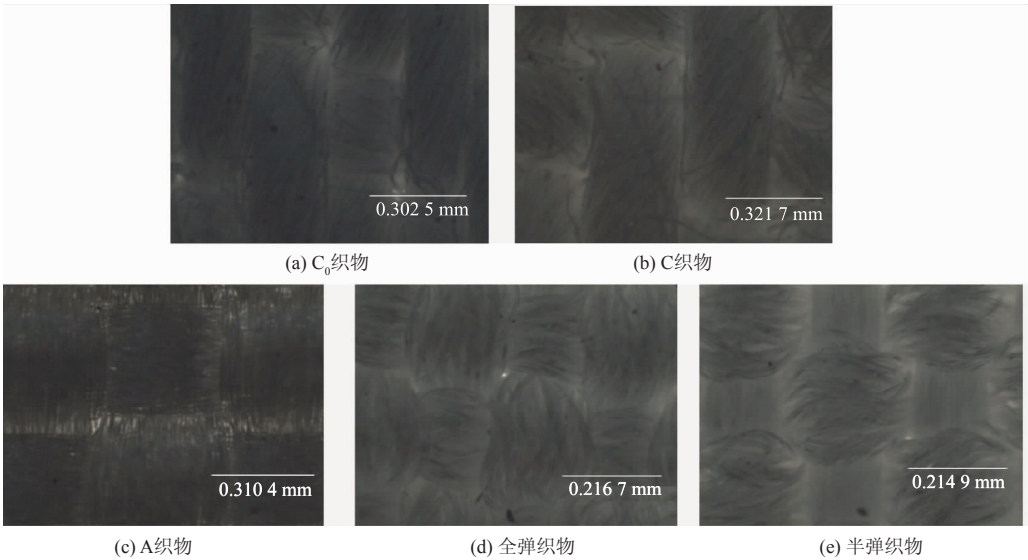


图 1 织物实物
Fig.1 Pictures of fabrics

1.1.2 仪器 HR941NC 高速摄像机,湖南科天健公司提供;全自动透气量仪 YG461E-Ⅲ,宁波纺织仪器厂制造。

1.2 方法

为了研究动态气流冲击下织物的透气性能,搭建了动态透气性实验平台,具体如图 2 所示。图 2 中,左侧是气压控制部分。储气罐可用于储存任何高压气体,以确保在测试过程中空气流动的稳定性;开关阀用于控制气流的释放和停止;压力控制阀用来控制进入右侧气压测量部分的空气压力。

1 材料及方法

1.1 原料与仪器

1.1.1 原料 弹性织物、安全气囊织物以及非弹性斜纹织物(安全气囊织物由英国诺丁汉大学提供,其他织物均为小样机织造)。其中全弹织物的经纬纱均为锦纶氨纶包缠纱;半弹织物的经纱为锦纶氨纶包缠纱,纬纱为锦纶长丝;C 及 C₀ 织物纱线原料为 C/T 混纺纱;安全气囊织物 A 的纱线原料为锦纶长丝。具体织物参数规格见表 1。光学显微镜下,织物实物如图 1 所示。

在气压测量部分,气体进入管道,冲击织物,并穿过织物融入到外界空气中;数字压力计显示该管道内气流迅速变化的一个过程;同时高速摄像机实时记录数字压力表数据。具体实验方案如下:

- 1)测量不同弹性的两种织物在 0.3 MPa 时所承受的压力变化。
- 2)测量 A 织物在不同的初始气压(0.2,0.3,0.4 MPa)条件下所承受的压力变化。
- 3)测量不同紧度的织物在 0.3 MPa 条件下所承受的压力变化。

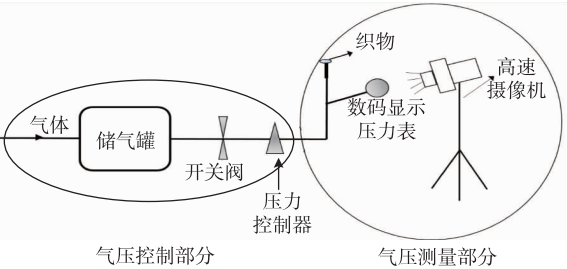


图 2 渗透性实验平台搭建模型

Fig.2 Model of permeability experiment platform

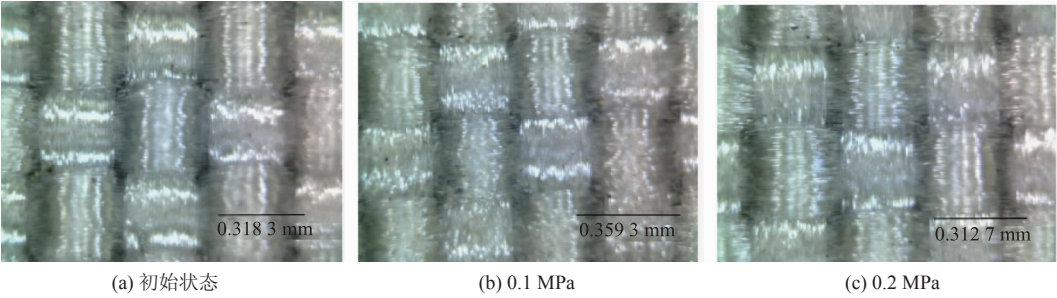


图 3 A 织物

Fig.3 Fabric A

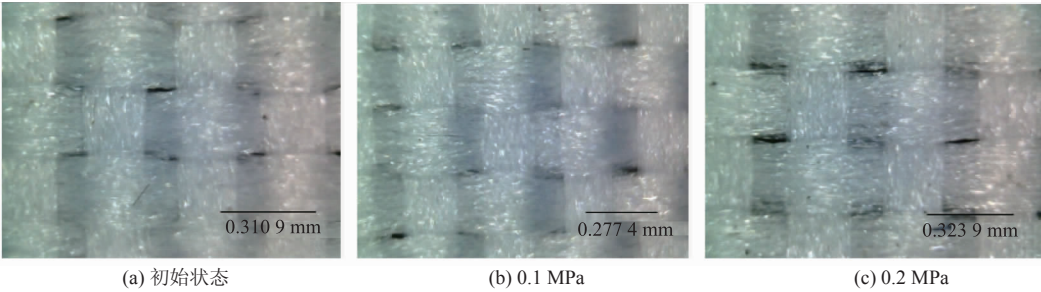


图 4 全弹织物

Fig.4 Elastic fabric

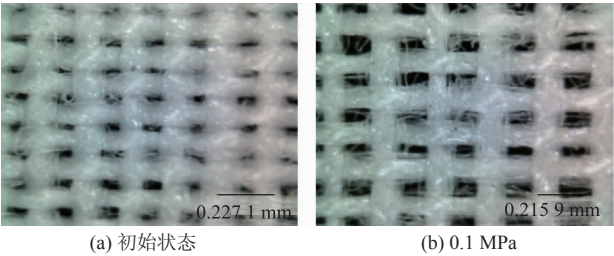


图 5 U 织物

Fig.5 Fabric U

图 3 为安全气囊织物 (A 织物), 结构最为紧密。通过观察可以发现, A 织物在气流的冲击作用下, 纱线与纱线之间交叠得更加紧密。在如此紧密的条件下, 即使压力达到较高的 0.2 MPa, 织物中纱线之间依然没有滑移, 织物紧密程度更高。图 4 为全弹织物, 其紧度低于 A 织物。由图 4 可以看出, 在 0.1 MPa 压力作用下, 织物中相邻两根纱线相比

1.3 实验原理

1.3.1 气流冲击下紧密织物结构变化 当气压作用于织物表面时, 紧密织物的纱线与纱线之间距离较小, 外力使相互交错的织物紧密贴合在一起, 导致织物之间的孔隙越来越小, 最终使织物的透气性越来越差; 非紧密织物的纱线与纱线之间距离原本比较大, 气流的冲击作用使得纱线之间距离越来越大, 所以其透气性也会越来越强。图 3 ~ 图 5 为 3 种织物在不同压力作用下的结构变化。

初始状态更加紧密; 在 0.2 MPa 压力作用下, 气流冲击使织物的孔隙逐渐变大。为进行对比实验, 文中又选取了一种 U 织物, 其属于疏松织物, 紧度为 75.3%, 具体如图 5 所示。对比发现, 这种非紧密织物由于相邻两根纱线没有重叠或者紧紧靠近, 所以在 0.1 MPa 压力条件下, 织物发生面外变形更多的是由于纱线之间距离变大, 导致织物孔隙变大, 从而使织物的透气性增强。

1.3.2 恒压条件下紧密织物的透气性测试 为了对比织物在准静态气压下的透气性, 通过全自动透气量仪进行透气性测试。实验条件为: 压差 300 Pa, 实验面积 20 cm²。

在一定压差下, 多孔介质允许流体通过的能力称为渗透率^[9]。透气速率为气体通过织物单位面积的气流速度。根据达西定律式可以得到织物的渗透率, 其关系式为

$$\Delta P = \frac{\mu lv}{K} \tag{1}$$

式中: ΔP 为压差; μ 为空气黏度; l 为织物厚度; v 为透气速率。

织物的透气速率及渗透率见表 2。

表 2 织物透气速率及渗透率

Tab.2 Rate and permeability of fabrics

织物品种	透气速率/(mm/s)	渗透率/ μm^2
A 织物	15.2	0.3
全弹织物	185.5	3.9
半弹织物	144.0	3.0
C ₀ 织物	171.5	3.6
C 织物	78.5	2.2

由表 2 可以看出,实验样品中 A 织物的渗透率最低,全弹织物的渗透率大于半弹织物。全弹织物由于经纬纱线均是弹性纱,纱线屈曲较多,所以织物中的孔隙相比半弹织物更多。因此,纱线的形态间接影响织物的渗透率。对比 C₀ 与 C 织物可知,两种织物紧度不同,C 织物的紧度较大,渗透率小,因此织物紧度是影响织物透气性的关键因素。

1.3.3 气流冲击下织物动态透气性实验 对容器内空气采用的理想气体方程为

$$PV = mR'T \tag{2}$$

式中: P 为容器内绝对压力; V 为容器体积; m 为容器内所含空气的质量; R' 为通用气体常数除以气体摩尔质量; T 为容器内气体的绝对温度。当空气通过织物排出时,罐内的空气质量以及压力逐渐减少。根据储气罐的热容和标准实验环境, T 可认为是恒定不变的常数。式(2)对时间 t 的微分方程为

$$V \frac{dP}{dt} = R'T \frac{dm}{dt} \tag{3}$$

将式(3)应用于常压下的罐内逃逸空气,其方程式为

$$P_{\text{atm}} V' = R'T_{\text{atm}} \frac{dm}{dt} \tag{4}$$

式中: V' 为空气相对于质量流量的自由体积流量; P_{atm} 为绝对压力; T_{atm} 为常压下气体温度,可默认为 T 。

根据式(3)和式(4)可以得到

$$V' = \frac{V}{P_{\text{atm}}} \frac{dP}{dt} \tag{5}$$

气流通过织物(单位面积流量)的表层速率为

$$v = \frac{V'}{A} \tag{6}$$

式中: v 为表层速率; A 为测试面积。因此气体速率与压力梯度的关系变为

$$v = \frac{V}{A \cdot P_{\text{atm}}} \cdot \frac{dP}{dt} \tag{7}$$

气压与渗透性的关系可以用弗赫海默方程表达^[10],方程式为

$$-\frac{\partial P}{\partial X} = \frac{\mu}{K} v + \beta \rho v^2 \tag{8}$$

式中: μ 为流体黏度; K 为织物的渗透率; ρ 为流体密度; β 为多孔介质参数(非达西流动系数)。XIAO X L^[9] 提到 K 和 β 是多孔介质关于孔隙率和孔径的函数,因此是多孔介质的固有特性。

2 实验结果

2.1 气压与时间的关系

根据实验方案,测得 5 种织物在承受气流冲击时,其冲击压力与透气时间的关系,具体如图 6 所示。

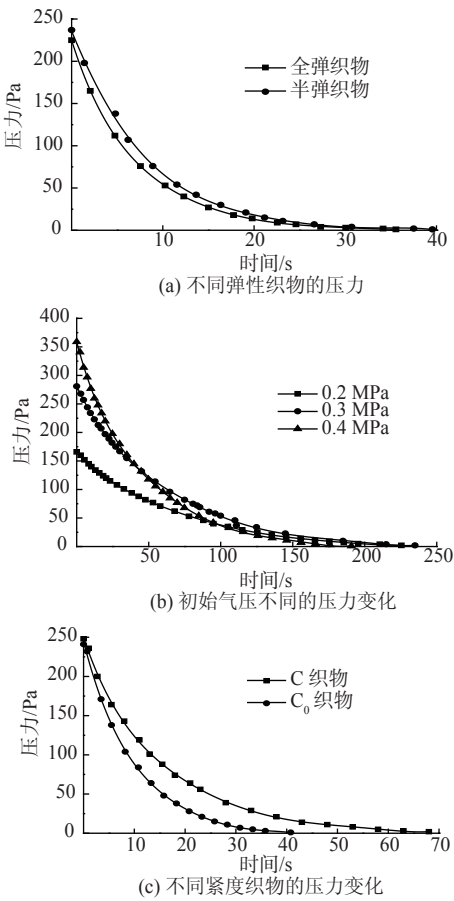


图6 不同织物承受的压力变化与时间的关系
Fig.6 Relation of pressure and time

表 3 ~ 表 5 分别为图 3(a) ~ 图 3(c) 3 种条件下拟合出趋势线 ($y = B_6x^6 + B_5x^5 + B_4x^4 + B_3x^3 + B_2x^2 + B_1x + C$) 的系数。

表 3 图 3(a) 中趋势线系数
Tab.3 Trend line coefficients of Fig. 3 (a)

变 量	全弹织物		半弹织物	
	系 数	标准差	系 数	标准差
C	224.856 40	0.458 40	235.869 17	2.485 58
B_1	-34.183 42	0.441 78	-26.503 75	2.291 26
B_2	2.794 78	0.122 56	1.047 54	0.576 74
B_3	-0.148 91	0.013 77	0.001 70	0.058 07
B_4	0.004 92	7.300 02	-0.001 43	0.002 75
B_5	-8.853 36	1.821 02	4.136 86	6.155 96
B_6	6.566 54	1.722 04	-3.762 93	5.224 27

表 4 图 3(b) 中趋势线系数
Tab.4 Trend line coefficients of Fig. 3 (b)

变 量	0.2 MPa		0.4 MPa		0.5 MPa	
	系 数	标准差	系 数	标准差	系 数	标准差
C	166.373 56	0.364 65	281.198 74	1.035 57	358.928 00	0.995 87
B_1	-2.854 56	0.052 47	-5.453 04	0.147 67	-9.661 61	0.170 51
B_2	0.036 00	0.002 27	0.073 38	0.006 51	0.172 51	0.008 73
B_3	-3.740 64	4.058 59	-7.631 13	1.173 79	-0.002 20	1.861 97
B_4	2.403 80	3.433 92	4.841 41	9.869 80	1.679 47	1.872 61
B_5	-7.994 35	1.365 23	-1.581 35	3.859 48	-6.632 79	8.820 33
B_6	1.052 62	2.053 50	2.031 70	5.665 76	1.038 33	1.567 99

表 5 图 3(c) 中趋势线系数
Tab.5 Trend line coefficients of Fig. 3 (c)

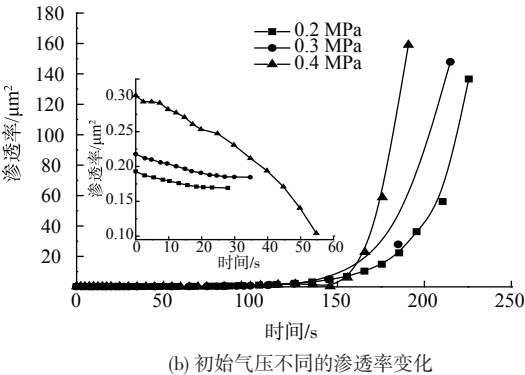
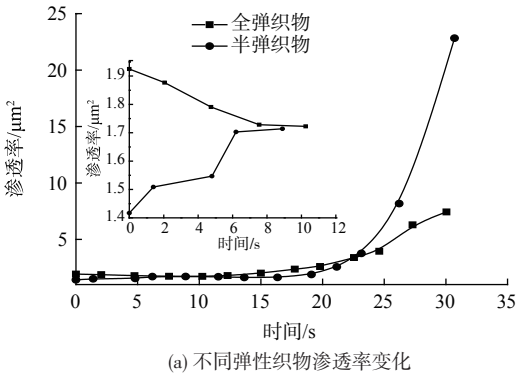
变 量	C 织物		C ₀ 织物	
	系 数	标准差	系 数	标准差
C	249.813 77	1.750 22	244.375 67	1.776 74
B_1	-19.395 61	0.925 14	-25.106 46	1.696 29
B_2	0.933 86	0.134 97	1.275 83	0.427 15
B_3	-0.031 33	0.007 99	-0.038 18	0.042 58
B_4	6.392 79	2.228 01	5.730 12	0.001 98
B_5	-6.866 37	2.913 55	-1.769 27	4.334 04
B_6	2.951 01	1.440 56	-2.988 63	3.576 76

图 6(a) 为在 0.3 MPa 初始压力条件下,不同弹性织物所承受压力随时间的变化。当压力阀打开后,由于管道、织物透气量等原因,导致初始气压值低于 0.3 MPa。在气流冲击初期,全弹织物的透气量明显高于半弹织物;整个过程中,全弹织物所承受的压力始终小于半弹织物。图 6(b) 为非涂层安全气囊织物在不同初始气压条件下所承受的压力变化。由于初始气压不同,最初织物承受的压力 $P_{0.4\text{ MPa}} > P_{0.3\text{ MPa}} > P_{0.2\text{ MPa}}$,但随着时间的变化,初始气压越大,织物受力越大,则导致织物变形越大,所以内部气体迅速逃逸,导致织物受力减小。对比图 6(b) 中 3 条曲线亦可知,织物所受初始气压越大,织物承受的压力则下降越快。透气时间 130 s 左右开始,初始气压值最小的织物所承受的压力反而稍大于初始气压值最大的织物。图 6(c) 为在 0.3 MPa

的初始压力条件下,不同紧度的织物所承受压力的变化曲线。其中,C 织物紧度大于 C₀ 织物紧度。由图 6(c) 可知,当织物紧度较大时,气体渗透的速率明显小于紧度较小的织物;当织物紧度较小时,其所受压力降到 0 所用的时间要小于紧度大的织物。

2.2 渗透率与时间的关系

根据式(7)与式(8)可以得到渗透率与时间的关系,具体如图 7 所示。



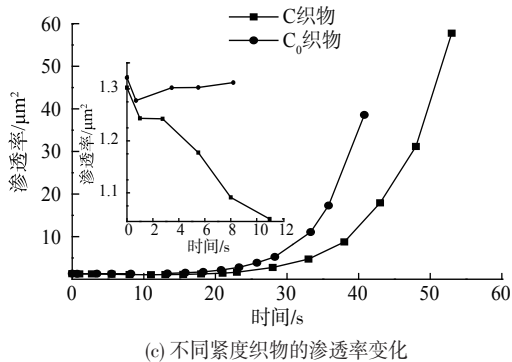


图7 不同织物渗透率变化与时间关系

Fig. 7 Relation of permeability and time

图7(a)为不同弹性织物在相同压力下透气性的变化。由图7(a)可知,前期全弹织物的透气性大于半弹织物,在时间22 s左右,半弹织物的透气性逐渐超越全弹织物且两者的差距越来越大。图7(b)为安全气囊织物在不同初始压力下透气性的变化。由图7(b)可知,对于安全气囊织物而言,织物的透气性较小,则需要较长时间将容器内的气压放出直至与外界大气压相等;当容器内初始压力值较大时,则在较短时间内即可达到与外界气压的平衡,且透气性也相对较大。图7(c)为不同紧度的织物在相同压力下透气性变化。由图7(c)可知,织物紧度较大时,在相同时间点织物的透气性较小,且容器达到与外界压力平衡的时间较长。此外,织物的透气性与织物的紧度密切相关,织物紧度高于某个临界点后,在高压气冲击下初始透气性逐渐下降。织物在持续气流冲击后,透气性不断增大,最终达到最大值。这是因为气流冲击会使纱线之间更为紧密,孔隙率更低,随着高压气体的渗透,储气罐中的气压逐渐降低,织物的变形逐渐回复至初始阶段,孔隙率增大,透气性逐渐提升。

3 结语

文中主要研究5种织物在不同条件下的渗透率变化。实验证明,织物渗透率与织物的紧度、组织结构、初始压力等密切相关。织物紧度较大时,在相同的外界条件下,织物的渗透率较小,容器内压力达到与外界平衡需要更长的时间;当初始压力较大时,在相同的外界条件下,织物的渗透率较大,容器内达到与外界平衡的时间相对较短。但对于弹性织物而言,织物的渗透率和其他非弹性织物略有不同。全弹织物的渗透率前期大于半弹性织物,后期其渗透率则逐渐小于半弹性织物,且与半弹织物的渗透率差距越来越大。文中从机理角度探讨纤维纱线材料及其柔性交织结构在外力作用下产生变

形后引起的渗透率变化问题,特别是变形机理和交错结构三维角度的变化机理,可以为新型轻薄防护材料的设计提供理论参考。

参考文献:

- [1] 刘春娜. 安全气囊织物动态透气性能的研究[D]. 上海: 东华大学, 2007.
- [2] 季莹, 胡国伟, 胡飞侠. 安全气囊气囊的技术现状及发展趋势[J]. 汽车与配件, 2012(10): 34-37.
JI Ying, HU Guowei, HU Feixia. Technical status and development trend of airbag[J]. Automobile and Parts, 2012(10): 34-37. (in Chinese)
- [3] 马衍富. 开创一代新型救生伞的弹性织物[J]. 产业用纺织品, 1984(1): 12-17.
MA Yanfu. Elastic fabric for creating a new generation of life-saving umbrella[J]. Technical Textiles, 1984(1): 12-17. (in Chinese)
- [4] 甘小娇. 环帆伞结构透气量对气动性能的影响[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [5] LIN H, CLIFFORD M J, TAYLOR P M, et al. 3D mathematical modelling for robotic pick up of textile composites[J]. Composites Part B (Engineering), 2009, 40(8): 705-713.
- [6] 韩晓果, 肖学良, 钱坤. 紧密机织物高压下面外变形的机制[J]. 纺织学报, 2017, 38(7): 49-55.
HAN Xiaoguo, XIAO Xueliang, QIAN Kun. Out-of-plane deformation of tight woven fabric under high air pressure[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(7): 49-55. (in Chinese)
- [7] 韩晓果, 肖学良, 钱坤, 等. 高弹紧密织物均压下面外变形的数理模型[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2018, 44(6): 909-915.
HAN Xiaoguo, XIAO Xueliang, QIAN Kun, et al. A mathematical model for out-of-plane deformation of high-elastic tight fabric under uniform pressure[J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2018, 44(6): 909-915. (in Chinese)
- [8] 韩晓果, 贾明皓, 肖学良, 等. 防护类织物面外变形的研究进展[J]. 服装学报, 2018, 3(6): 1-8.
HAN Xiaoguo, JIA Minghao, XIAO Xueliang, et al. Research progress on out-of-plane deformation of protective fabrics[J]. Journal of Clothing Research, 2018, 3(6): 1-8. (in Chinese)
- [9] XIAO X L, LONG A, ZENG X S. Through-thickness permeability modelling of woven fabric under out-of-plane deformation[J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(21): 7563-7574.
- [10] 崔传智, 刘慧卿, 耿正玲, 等. 天然气高速非达西渗流动态产能计算[J]. 特种油气藏, 2011, 18(6): 80-82.
CUI Chuazhi, LIU Huiqin, GENG Zhengling, et al. Calculation of dynamic productivity of natural gas in high velocity non-Darcy flow[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2011, 18(6): 80-82. (in Chinese)

(责任编辑: 沈天琦, 邢宝妹)