

基于多元统计分析的 P 类膜材强度回归分析

杨 彬, 吴梦琳, 张其林, 霍震霆, 赏莹莹

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 统计了工程中常用的 55 种 P 类膜材的规格参数, 包括经纬向纱线密度、纤度、克重、厚度等, 整理研究了团队累积的膜材力学性能检测数据, 得到了涂层织物类膜材的基本力学性能数据库。在此基础上, 利用多元统计方法中的经典方法对涂层织物类膜材组织结构参数及其相关试验结果进行分析, 包括力学性能指标的相关性分析和力学性能指标的影响因素分析, 确定各项参数对膜材强度指标的影响, 采用二元线性回归分析方法, 分别建立了 P 类膜材抗拉强度和撕裂强度的回归模型, 可用于膜材生产和膜结构设计分析。

关键词: P 类膜材; 抗拉强度; 撕裂强度; 回归分析

中图分类号: TB43

文献标志码: A

Regression Analysis of Strength of P-Type Membrane Based on Multivariate Statistical Analysis

YANG Bin, WU Menglin, ZHANG Qilin, HUO Zhenting, SHANG Yingying

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, the specification parameters of 55 kinds of coated fabric membrane materials commonly used in engineering at home and abroad are counted, including warp and weft yarn density, fineness, grammage, thickness, etc.. The mechanical test results accumulated were sorted out, and data of the basic mechanical properties of coated fabric membrane materials were obtained. The multivariate statistical method was used to analyze the structure parameters and test results of coated fabric membrane materials, including the correlation analysis of mechanical properties and the influencing factors of mechanical properties. The influence of various parameters on these strength indexes of membrane materials was determined, and the further

linear regression analysis was conducted. The regression models of tensile strength and tear strength were established respectively, which could be further applied to membrane material production and membrane structure design.

Key words: P-type membrane material; tensile strength; tear strength; regression analysis

涂层织物类膜材料由于其质量轻、强度高、美观等特点, 近年来被广泛应用到建筑结构当中。作为一种柔性复合材料, 涂层织物类膜材料的本构关系具有各向异性、非线性和黏弹性等特点。根据中国工程建设协会标准《膜结构技术规程》(CECS158: 2015)^[1]的规定, 涂层织物类膜材根据纱线的材质可以分为 G 类和 P 类 2 种, G 类是指在玻璃纤维织物基材表面涂覆聚合物连续层的涂层织物, P 类膜材是指在聚酯纤维织物基材表面涂覆聚合物连续层并附加面层的涂层织物。本文选取应用较广、已有较多研究积累的 P 类膜材进行研究。

膜材的主要力学性能对于膜结构性能而言至关重要。随着膜材的广泛应用和科研技术的进一步提升, 对膜材进行单、双轴力学性能测试已成为最基本的研究方法。目前, 针对涂层织物类膜材的力学性能研究试验可以分为单轴拉伸和双轴拉伸两大类, 其中单轴拉伸试验可用于检测膜材的抗拉强度、断裂延伸率、撕裂强度、涂层剥离强度、剪切模量、徐变性能等, 双轴拉伸试验则主要用于检测膜材的双轴弹性模量及泊松比。张营营等^[2]对上海世博轴膜结构工程的局部足尺模型进行了试验, 分析了膜材节点的力学性能, 同时对膜材的单轴双轴力学性能进行了研究, 分析了膜材的破坏强度准则及其适用性, 设计了双轴破坏试验, 分析了膜材的破坏模式。刘

收稿日期: 2021-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(51778458)

第一作者: 杨 彬(1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为膜材料力学性能、大跨度结构健康监测、智能建造。E-mail: yangbin@tongji.edu.cn

通信作者: 吴梦琳(1996—), 女, 硕士生, 主要研究方向为膜材料老化性能。E-mail: 1932522@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

倩楠^[3]对织物的拉伸力学性能进行了详细分析研究,织物拉伸时,受拉的纱线由于伸直产生张力,使另一方向纱线在交织点处受到厚度方向的挤压力而导致弯曲,并同时产生剪切力反作用于受拉纱线,随着拉伸力增加,纱线系统相互作用加剧,使织物结构遭到破坏。

近年来,膜结构工程经常会出现膜材的撕裂破坏。建筑膜材料的撕裂破坏通常是在膜结构安装应力或预应力作用下,由膜材料上的初始小洞、裂缝或其他缺陷引发,之后可能会受强风等因素影响而迅速扩大导致膜结构整体破坏。由于撕裂破坏对于膜材料的安装和使用安全有密切关系,膜材的撕裂强度成为衡量破损发生扩展的重要指标,因此膜材撕裂性能的研究受到了普遍的关注^[4-5]。

涂层织物类膜材由织物基材、涂层和面层组成,各组分的性能与膜材的力学性能紧密相关,因此利用统计方法开展膜材各组分指标性能指标与膜材力学性能之间的相关性研究对于从细观角度探究膜材受力机理具有重要意义。膜材的组织结构主要包含纱线密度、纤度、克重、厚度等参数,已有研究成果指出细观层面的组织结构参数对于宏观层面的力学性能指标具有重要的影响。Mobarak^[6]通过对近年来相关文献的分析,对影响织物强度性能的因素进行了综述,认为纱线支数、细度、纱线密度、织物结构等都会影响织物强度,基于力学的数学模型由于不能考虑到所有因素,结果往往不太满意,进一步利用统计工具可以综合考虑各项影响参数,得到较好的强度预测结果。何琼等^[7]对机织物增强压延柔性复合材料的撕裂、剥离和拉伸性能进行了研究,对不同纱线细度、织物密度和涂层厚度的复合材料进行试验测试,并给出了机织物压延类柔性复合材料撕裂强力、剥离强力等线性回归公式。

由于P类膜材规格较多,受限于膜材样本数量的原因,在开展膜材各组分指标同膜材性能相关性研究时,主要采用传统统计方法开展研究,在统计方法的运用上仍较为局限。多元统计分析是研究多元随机变量彼此之间的相互依赖的统计规律关系的一种综合分析方法^[8],主要内容包括多元正态分布及其抽样分布、假设检验、多元方差分析、多元回归分析、相关性分析、主成分分析与因子分析、判别分析与聚类分析等^[9-10]。本研究团队长期从事膜材检测等科研工作,积累了大量的P类膜材检测数据,收集了市场上常见P类膜材的规格信息,具备采用多元统计经典分析方法的条件,针对膜材力学性能之间

的相关性以及各组分参数对力学性能指标的影响展开研究,并进一步选取主要影响因子,对抗拉强度和撕裂强度与相应影响因子之间的关系进行回归分析,提出相应的回归公式。

1 膜材力学性能指标的相关性分析

膜材的力学性能是膜材性能的关键因素,由于纤维的编织和涂层的涂覆,经向和纬向纤维具有不同的特征,但在膜结构中,膜材料通常处于双向拉伸的状态,要求膜材料在2个方向上均能保证一定的强度,同时撕裂强度本质是单根纱线的断裂,而抗拉强度是多根纱线断裂的结果,所以认为撕裂强度与抗拉强度之间存在一定相关性。采用最小二乘法,针对膜材力学性能指标之间的相关性展开研究,计算不同力学指标之间的Pearson相关系数,以研究力学性能指标之间的相关性好坏,并采用F统计量进行显著性检验,从而保证结果的有效和可靠。

为了得到准确的统计分析结果,需要保证充足的样本数据量,在汇总各膜材生产厂商提供的膜材出厂数据的基础上,搜集得到了已有文献^[11-15]提到的P类膜材数据,结合研究团队积累的大量试验数据,共计55种膜材,整理具体的膜材品牌型号列于表1,并汇总整理了主要力学性能数据的出厂值和试验值,相关试验指标均是按照《膜结构检测标准》(DG/TJ 08-2019—2019)进行试验后获得的试验平均值。

1.1 膜材经、纬向拉伸和撕裂性能相关性分析

利用汇总整理的试验数据,首先针对膜材拉伸和撕裂性能进行相关性分析,包括经向与纬向抗拉强度的相关性研究、经向与纬向撕裂强度的相关性研究、同一方向抗拉强度与撕裂强度之间的相关性研究,数据分为出厂值和试验值两部分,结果列于表2。

从表2可以看出,3组相关性在出厂值和试验值上均呈现出非常显著的正相关性,对于出厂值,Pearson相关系数均大于0.9,且均略大于相应的试验值相关系数,对于试验值,Pearson相关系数最小为0.873,因此,可以认为3组关系均是明显的线性关系。这是因为膜材在生产过程中,虽然经纬向采用的涂层和基材和规格是一样的,以达到工程中对于膜材在双向受力状态下经纬向应当具有较为一致的力学性能的要求,但是由于膜材在生产过程中会对经向基材施加预应力,导致经纬向的力学性能之

表 1 膜材品牌和型号
Tab. 1 Brand and model of membrane materials

膜材品牌	膜材型号
HIRAOKA	250T、350T、450T、550T、212T、312T、412T、MC450、MC350
SIJIA	M372FA(SJ1)、M495FA(SJ2)、M4105FA(SJ3)、M5105TF(SJ4)、M6125TF(SJ5)、M7145TF(SJ6)
Duraskin	B1018、B4008、B6915、B6951、B6617、B6618、B6092
Mehler	FR-700、FR-900、FR-1000、FR-1400、FR-1600、WTC8540、8506、8964
Serge Ferrari	1302T、1202T、1002S2、1502、702
KOBOND	MB-68121、MC-13122
HEYtex	5572、5573、5574
XINGYIDA	4095、5105、6125
NAIZIL	NZ1、NZ2、NZ3、NZ4、NZ5、NZ6、NZ7、NZ8

表 2 单轴力学性能相关性分析
Tab. 2 Correlation analysis of uniaxial mechanical properties

经向与纬向拉伸强度		经向与纬向撕裂强度		抗拉强度与撕裂强度			
出厂值	试验值	出厂值	试验值	经向出厂值	纬向出厂值	经向试验值	纬向试验值
0.990***	0.969***	0.979***	0.952***	0.977***	0.948***	0.951***	0.873***

注:表中数值表示相关系数,“***”号代表显著性。根据统计学原理中的显著性差异(Significant difference)理论,显著性概率Sig. 值在 0~0.001 间表示数据之间具备非常显著的关系,用“***”号表示;Sig. 值在 0.001~0.01 之间表示非常显著,用“**”号表示;Sig. 值在 0.01~0.05 之间表示比较显著,用“*”号表示;Sig. 值在 0.05~0.1 之间表示显著,用“.”号表示;Sig. 值在 0.1~1 之间表示不显著,用“ ”表示。

间存在差异。
根据我国规范《膜结构用涂层织物》(GB/T30161—2013)的规定,涂层织物类膜材的纬向抗拉强度不应低于经向抗拉强度的 80%,基于已有数据,对出厂值和试验值分别计算并绘制经纬向抗拉

强度比值的散点图及直方图,见图 1。图中 L_1 代表经向拉伸强度出厂值, L_2 代表纬向拉伸强度出厂值, l_1 代表经向拉伸强度试验值, l_2 代表纬向拉伸强度试验值, $N \cdot (5\text{cm})^{-1}$ 。

根据图 1a,除了 2 组产品的经纬向抗拉强度比

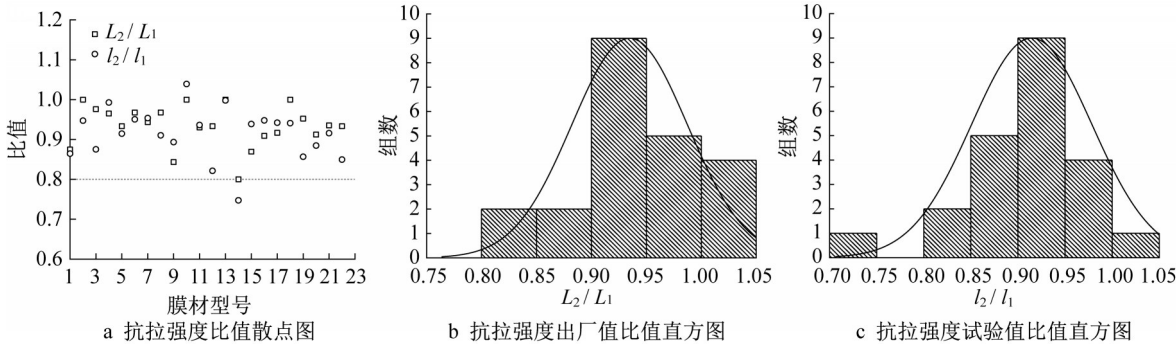


图 1 经、纬向抗拉强度比值
Fig. 1 Ratio of tensile strength in weft and warp directions

值不大于 0.8,其余比值均大于 0.8,满足规范要求。图 1b、1c 中的曲线为基于计算的比值拟合的正态分布曲线,并通过显著性水平为 0.05 的 S-W 检验,计算得到 95% 置信下限列于表 3,分别为 0.85 和 0.81,满足规范要求。因此,可以认为规范《膜结构用涂层织物》要求的将 80% 作为经纬向抗拉强度比值下限合理可靠,可以在实际工程中将该比值作为评判膜材力学性能的依据。

近年来,由膜材撕裂引发的事故很多,撕裂强度越来越受到关注,成为评价膜材质量的一项重要指标。由于经纬向纱线编织差异,经纬向撕裂强度之

表 3 力学性能比值结果汇总
Tab. 3 Ratio of mechanical properties

指标	S—W 检验	95% 置信下限	推荐值
L_2/L_1	0.10	0.85	0.80
l_2/l_1	0.56	0.81	
S_2/S_1	0.96	0.81	0.75
s_2/s_1	0.07	0.76	
$S_1/(L_1 \times 1\text{cm})$	0.70	0.11	0.10
$S_2/(L_2 \times 1\text{cm})$	0.75	0.11	
$s_1/(l_1 \times 1\text{cm})$	0.53	0.11	
$s_2/(l_2 \times 1\text{cm})$	0.67	0.10	

间会存在一定差异,采用 P 类膜材经纬向抗拉强度比值的分析方法,对经纬向撕裂强度比值进行研究,

如图2。图中 S_1 代表经向撕裂强度出厂值, S_2 代表纬向撕裂强度出厂值, s_1 代表经向撕裂强度试验值, s_2 代表纬向撕裂强度试验值,单位N。

由图2a可知,除了2组数据经纬向撕裂强度比值存在较大偏差外,其余比值均大于0.75,出现偏差的原因可能是纬向撕裂强度的断裂延伸率较大,会

使撕裂三角区中有更多的纱线参与受力,进而增大撕裂强度。分别对出厂值和试验值两部分数据进行显著性水平为0.05的S-W检验,如表3,计算得到的经纬向撕裂强度比值的95%置信下限分别为0.81和0.76。因此,可以将经纬向撕裂强度比值不低于75%作为评判膜材力学性能的一个标准。

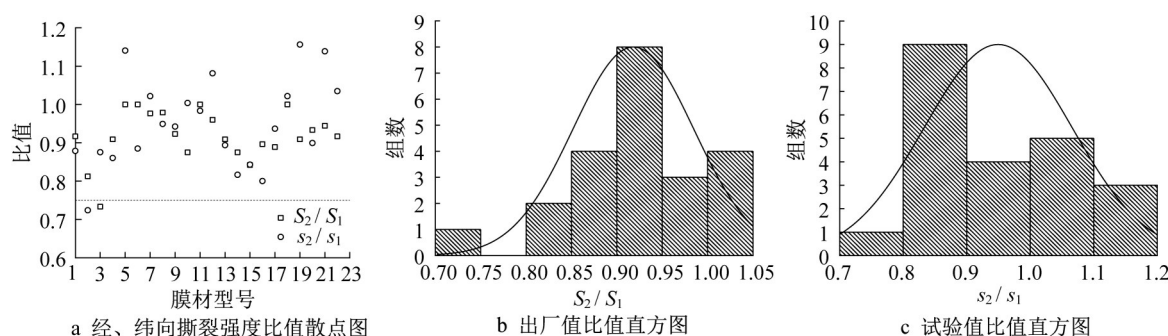


图2 经、纬向撕裂强度比值

Fig. 2 Ratio of tearing strength in weft and warp directions

《膜结构用涂层织物》(GB/T 30161—2013)对于涂层织物类膜材的撕裂强度和抗拉强度的关系也做了相关规定,要求P类涂层织物类膜材撕破强力不低于断裂强力值的8%。根据已有数据,将抗拉强

度乘以1cm转换成以牛顿(N)为单位,计算撕裂强度与对应方向转化的抗拉强度的比值,绘制相应的散点图与直方图(图3)。

由图3a可知,不论经向还是纬向,除了2组数据

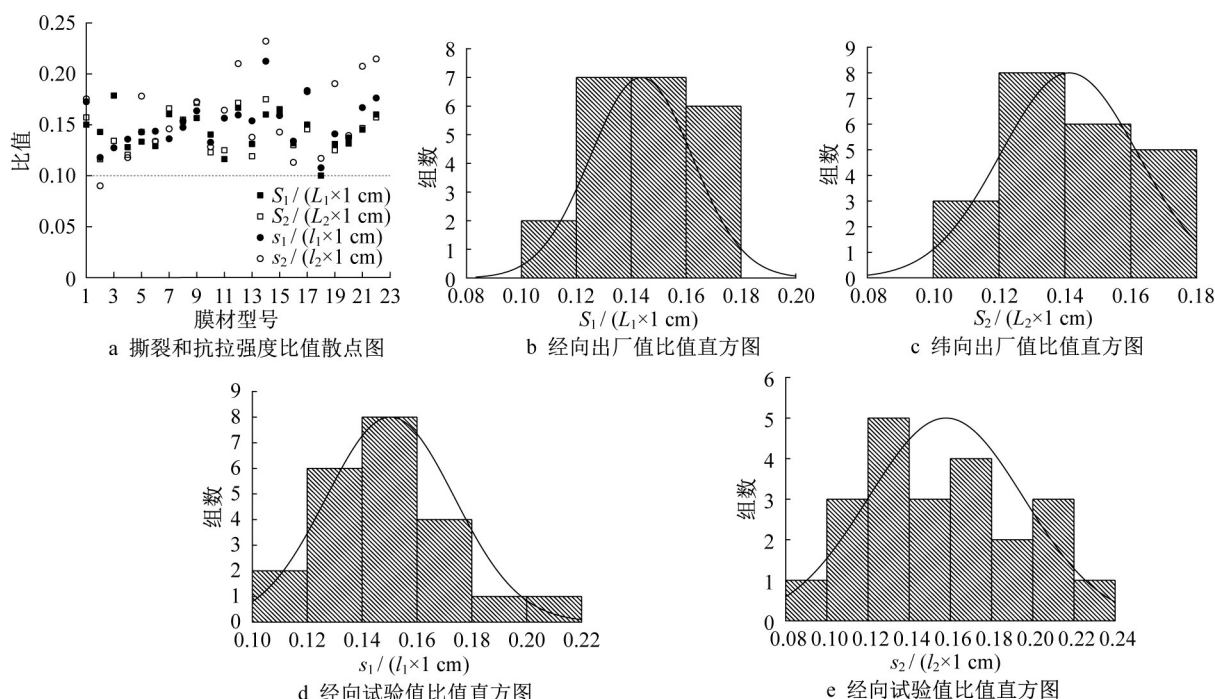


图3 撕裂强度和抗拉强度比值

Fig. 3 Ratio of tearing strength and tensile strength multiplied by 1cm

外,撕裂强度与抗拉强度的比值均大于0.1,在0.1~0.2的区间内呈正态分布,满足规范要求。通过S-W检验,计算得到正态分布95%的置信下限列于表3,

可见该比值的置信下限均满足规范要求。根据计算结果,建议可以将规范要求的撕裂强度与抗拉强度的比值下限提升到10%,以更好地保证膜材撕裂

性能。

1.2 膜材剥离强度与撕裂强度、抗拉强度的相关性分析

剥离强度反映了基材和涂层之间黏结力的大小,黏结力用来保证涂层和基材共同受力,因此剥离强度是一项重要的指标。基于已有数据,对试样的撕裂强度出厂值和剥离强度出厂值进行相关性分析,结果见表4。

表4 剥离强度与单轴力学性能相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of delaminating strength and uniaxial mechanical properties

撕裂强度出厂值		抗拉强度出厂值	
经向	纬向	经向	纬向
0.642***	0.602***	0.657***	0.672***

结果表明,在0.05显著性水平下,膜材撕裂强度、抗拉强度均与剥离强度具有显著的相关性,相关系数均大于0.6,认为具有相关性,随着剥离强度增大,涂层和基材之间黏结力增大,更好地完成共同受力,因此拉伸强度和撕裂强度均有所增大。

1.3 膜材撕裂强度与断裂延伸率的相关性分析

膜材在撕裂过程中会形成一个三角区,撕裂的过程实际是三角区域内纱线一根根断裂的过程。断裂延伸率反映了膜材的极限变形能力,因此延伸率增大,可能导致膜材在撕裂时三角区面积增大,进而影响膜材的撕裂强度。为了研究断裂延伸率与膜材撕裂强度之间的关系,基于已有数据,对膜材的撕裂强度和断裂延伸率进行相关性分析,结果见表5。

表5 断裂延伸率与撕裂强度的相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis of strain at break and tearing strength

撕裂强度出厂值		撕裂强度试验值	
经向	纬向	经向	纬向
0.593***	0.645***	0.544*	0.465(.)

结果显示,在0.05的显著性水平下,膜材的撕裂强度出厂值与断裂延伸率具有非常显著的相关性,撕裂强度试验值与断裂延伸率的相关性没有出厂值显著。总体来说,相关系数均大于0.4,经纬向撕裂强度分别随着经纬向断裂延伸率的增大而增大,这是由于断裂延伸率提升将会使撕裂三角区内有更多的纱线参与撕裂^[5-6]。

根据分析可知,抗拉强度和断裂延伸率均与撕裂强度具有一定的相关性,且抗拉强度和断裂延伸率具有一定关联性,为进一步研究撕裂强度与二者

之间的关系,选取抗拉强度和断裂延伸率作为影响因素对撕裂强度进行二元线性回归分析,回归结果见表6和图4,其中 b_1 代表抗拉强度, b_2 代表断裂延伸率。

表6 撕裂强度与抗拉强度、断裂延伸率的回归方程

Tab. 6 Regression equations of tearing strength with tensile strength and strain at break

撕裂强度	方程	F	Sig.	相关系数
S_1	$S_1 = -215.8 + 0.1723b_1 + 2.4664b_2$	261	0	0.944
S_2	$S_2 = -458.4 + 0.1949b_1 + 8.1205b_2$	130	8.88×10^{-16}	0.893
s_1	$s_1 = -295.1 + 0.2017b_1 + 0.2682b_2$	85	1.52×10^{-8}	0.924
s_2	$s_2 = -672.5 + 0.2277b_1 + 11.5500b_2$	22	4.96×10^{-5}	0.757

结果表明,在0.05显著性水平下,4个回归方程具有显著意义,拟合结果合理有效,相关系数均大于0.75,具有很好的相关性。根据回归方程的形式可以看出,随着抗拉强度的增加,撕裂强度增加,因为撕裂强度与纱线本身的抗拉强度有关,而膜材抗拉强度与纱线抗拉强度呈线性相关关系,因此撕裂强度与抗拉强度具有线性关系。随断裂延伸率增加,撕裂强度出厂值增加,因为撕裂三角区域面积随断裂延伸率增大而增大。

2 膜材抗拉强度的影响因素分析与多元回归

为了研究膜材规格参数对抗拉强度的影响,针对本文研究的P类膜材收集并整理了9种主要规格参数,主要包括纱线密度、纱线纤度、织法、克重、织物克重、涂层克重、厚度、涂层厚度以及织物截面。采用最小二乘法分别对各参数与抗拉强度进行线性回归分析,得到相关系数列于表7。

由表7可知,各参数均与抗拉强度呈现显著的相关关系。纱线密度和纱线纤度作为基材的主要技术指标,不论经向还是纬向,与抗拉强度的相关系数并不高,考虑到纱线密度一般可以看作是定值,纱线纤度指标作为与织物截面呈线性相关关系的指标可以与纱线密度结合起来进行综合分析,因此定义织物截面指标(类似于纺织领域的织物紧度)用于表示织物同一方向截面上的截面面积: $A_1 = m_1 \times f_1$, $A_2 = m_2 \times f_2$,其中, A 代表经向织物截面面积, m 代表纱线密度, f 代表纱线纤度,下标1、2分别代表经向、纬向。

从力学角度看,材料的抗拉强度与其截面面积具有正相关关系,因此对织物截面指标与抗拉强度进行拟合分析,得到Pearson相关系数列于表7,其相

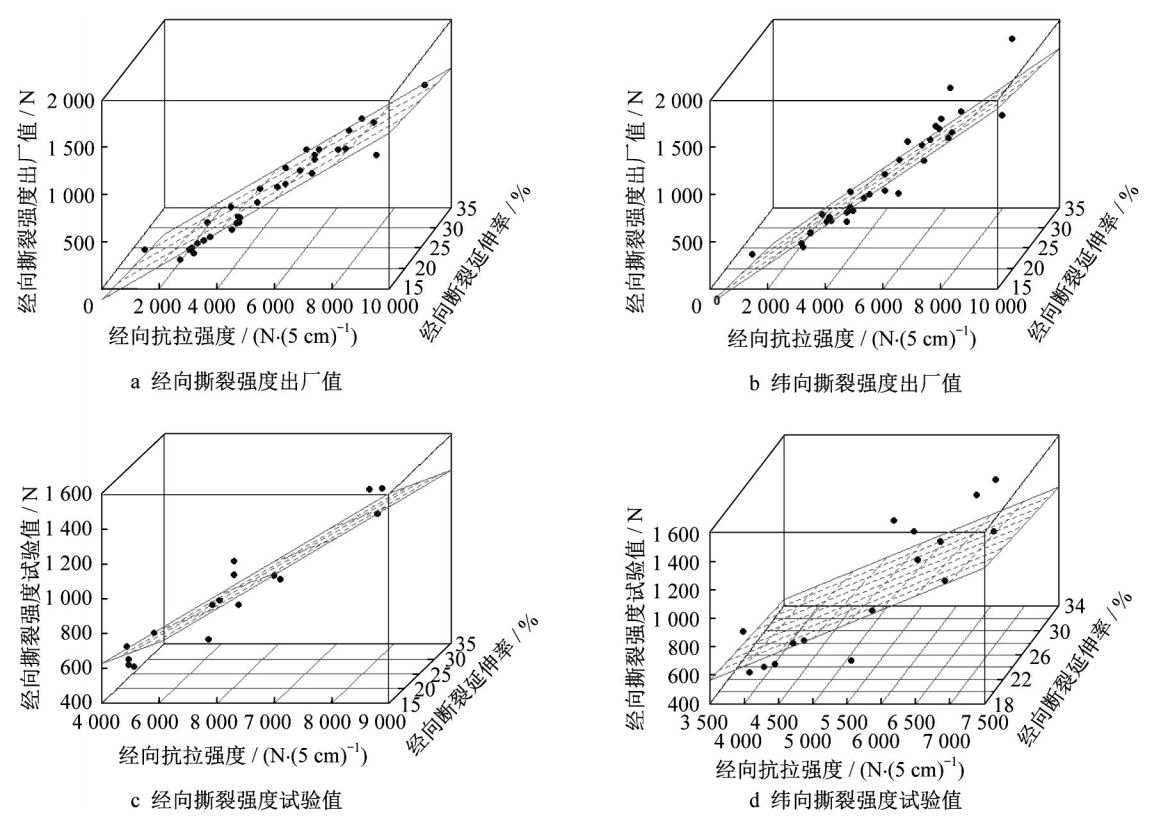


图 4 撕裂强度与抗拉强度、断裂延伸率的回归平面

Fig. 4 Regression plane of tearing strength with tensile strength and strain at break

表 7 抗拉强度与膜材不同规格参数的相关性分析

Tab. 7 Correlation analysis of tensile strength and different specification parameters of membrane materials

相关系数指标	纱线密度	纱线纤度	克重	织物克重	涂层克重	厚度	涂层厚度	织物截面
经向抗拉强度出厂值	0.763***	0.784***	0.965***	0.992***	0.839***	0.959***	0.725**	0.989***
纬向抗拉强度出厂值	0.748***	0.788***	0.964***	0.990***	0.834***	0.956***	0.686*	0.990***
经向抗拉强度试验值	0.712***	0.679***	0.959***	0.980***	0.851***	0.937***	0.777**	0.970***
纬向抗拉强度试验值	0.690**	0.694***	0.945***	0.962***	0.830***	0.929***	0.705*	0.958***

关系数接近于1,表明相对于单独的密度或者纤度参数,综合指标织物截面与抗拉强度呈现出更好的线性相关性,抗拉强度随着织物截面的增加而线性增大,利用该综合指标进行分析是合理有效的。

此外,由表 7 可见,不论是抗拉强度的出厂值还是试验值,相对于其他组织架构参数,克重和厚度分别与抗拉强度具有较高的相关系数,均大于 0.9,可以认为与抗拉强度具有很好的线性相关性,抗拉强度随着克重和厚度的增加具有明显的线性增加的趋势,厚度和克重指标均是能够同时反应膜材涂层和基材的指标,并且克重和厚度呈现正相关的关系,可以认为克重和厚度反映了同一指标。对比涂层克重和涂层厚度 2 个指标,涂层克重与抗拉强度呈现较好的相关性,因此本文选取克重作为主要影响因素。

由于膜材由基材和涂层两部分组成,综合考虑 2

个组成成分的影响,选取织物克重与涂层克重作为主要指标,采用 R 语言,利用最小二乘法对抗拉强度与织物克重和涂层克重进行二元线性回归拟合,结果如表 8。表中抗拉强度单位为 $\text{N}\cdot(5\text{cm})^{-1}$; x_1 代表织物克重, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; x_2 代表涂层克重, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

表 8 抗拉强度与织物克重、涂层克重的回归方程

Tab. 8 Regression equations of tensile strength with fabric and coating grammage

指标	方程	F	Sig.	相关系数
L_1	$L_1=13.49x_1+0.8860x_2$	9 113	2.20×10^{-16}	0.999
L_2	$L_2=10.98x_1+1.5470x_2$	8 241	2.20×10^{-16}	0.999
l_1	$l_1=14.90x_1+0.2968x_2$	2 619	0	0.997
l_2	$l_2=12.53x_1+0.8311x_2$	1 705	0	0.995

相应的回归结果见图 5、图 5 中数据点代表参与回归的膜材抗拉强度出厂值或试验值,平面代表二元线性回归拟合得到的膜材抗拉强度值。

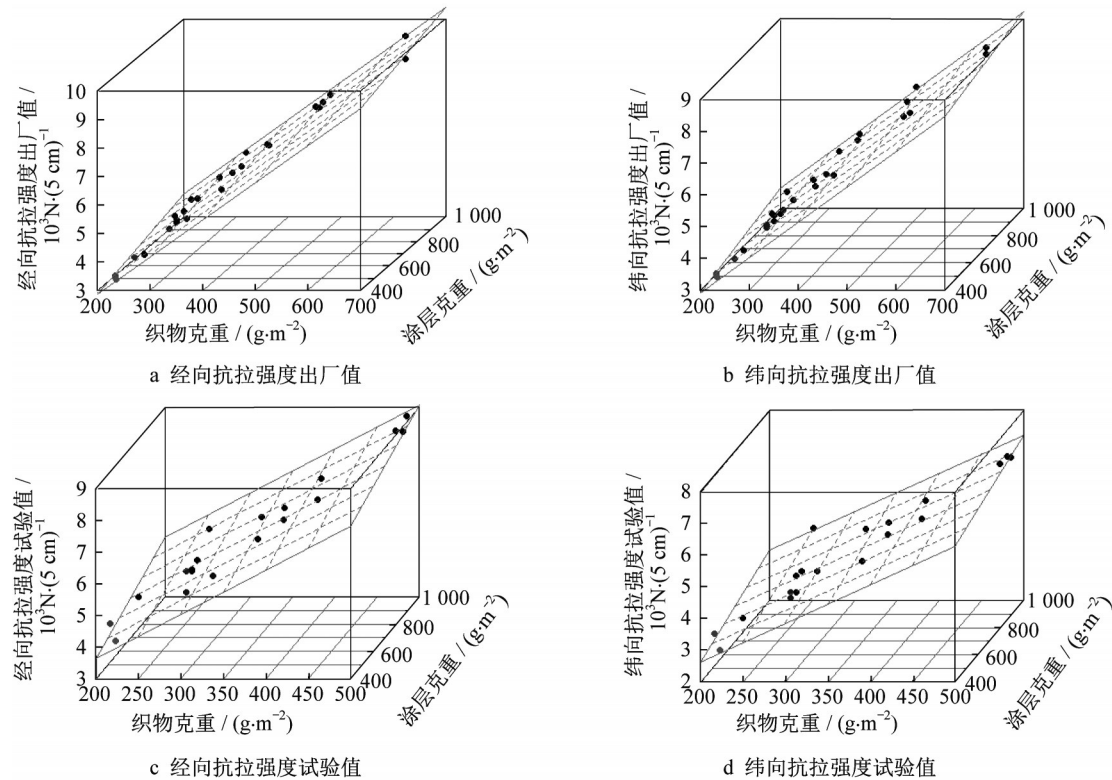


图5 抗拉强度与织物克重、涂层克重的回归平面

Fig. 5 Regression plane of tensile strength with fabric and coating grammage

抗拉强度出厂值的2个回归方程的 F 值均大于 $F_{0.05}(2, 23)=3.42$,并且显著性概率均小于5%,因此认为在5%显著性水平下,以上2个二元线性回归方程有显著意义,相关系数均为0.999,表明抗拉强度与织物克重和涂层克重之间具有很好的相关性。同理,抗拉强度试验值的2个回归方程的 F 值均大于 $F_{0.05}(2, 16)=3.63$,并且显著性概率均小于5%,因此认为在5%显著性水平下,以上2个二元线性回归方程有显著意义。

根据回归方程的形式,不论是出厂值还是试验值,随着纱线密度和纱线纤度的增加,抗拉强度显著增加。这是由于膜材的抗拉强度与纱线的强度线性相关,纱线纤度决定了纱线的断裂强力,纱线密度决定了同时受力的纱线根数^[13],因此拟合结果显示出了较好的线性相关性。

根据建立膜材强度值回归公式,可以为涂层织物类膜材料的生产制备提供理论依据和指导,并可进一步应用于工程设计。

3 膜材撕裂强度的影响因素分析与多元回归

为了研究膜材撕裂强度的影响因素分析,采用最小二乘法对膜材撕裂强度与影响因素开展相关系数研究,相关结果列于表9。

由表9可知,纱线密度、纱线纤度、总克重、织物克重、涂层克重、总厚度以及织物截面7个参数均与撕裂强度呈现出非常显著的相关性,且均为正相关,其中克重、织物克重、总厚度以及织物截面相关系数相对较高,均超过0.9。选取纱线密度和纱线纤度为

表9 撕裂与膜材不同规格参数的相关性分析

Tab. 9 Correlation analysis of tearing strength and different specification parameters of membrane materials

相关系数指标	纱线密度	纱线纤度	克重	织物克重	涂层克重	厚度	涂层厚度	织物截面
经向撕裂强度出厂值	0.748***	0.691***	0.943***	0.930***	0.807***	0.937***	0.775**	0.921***
纬向撕裂强度出厂值	0.750***	0.751***	0.927***	0.960***	0.809***	0.942***	0.796**	0.962***
经向撕裂强度试验值	0.548(.)	0.589**	0.905***	0.956***	0.851***	0.912***	0.851*	0.914***
纬向撕裂强度试验值	0.527(.)	0.695***	0.915***	0.949***	0.839***	0.943***	0.943***	0.915***

撕裂强度出厂值的主要影响因素,进行二元线性回归拟合,结果见表10和图6,其中 a_1 代表纱线密度, a_2 代表纱线纤度。

R语言结果显示在0.05显著性水平下,表10中的4个回归方程均具有显著意义,拟合结果合理有效。相关系数均大于0.80,具有较好的相关性,说明采用该形式进行回归是可靠的。

根据回归结果,除了经向撕裂试验值,其余3组回归结果均显示随着纱线密度和纱线纤度的增大,撕裂强度增大,纱线密度与纱线本身的强度有关,纱线纤度增大会导致撕裂三角区参与受力的纱线根数增多,因此2个回归因子与撕裂强度显示出较好的相关性。

表10 撕裂强度与纱线密度、纱线纤度的回归方程
Tab. 10 Regression equations of tearing strength with yarn density and fineness

撕裂强度	方程	F	Sig.	相关系数
经向撕裂强度出厂值	$S_1 = -1\,055 + 94.790a_1 + 0.478\,3a_2$	76	1.67×10^{-9}	0.894
纬向撕裂强度出厂值	$S_2 = -1\,094 + 89.060a_1 + 0.517\,8a_2$	149	6.33×10^{-12}	0.943
经向撕裂强度试验值	$s_1 = -1\,279 + 100.036a_1 + 0.630\,0a_2$	27	1.01×10^{-4}	0.841
纬向撕裂强度试验值	$s_2 = -1\,389 + 94.440a_1 + 0.732\,7a_2$	24	1.60×10^{-4}	0.826

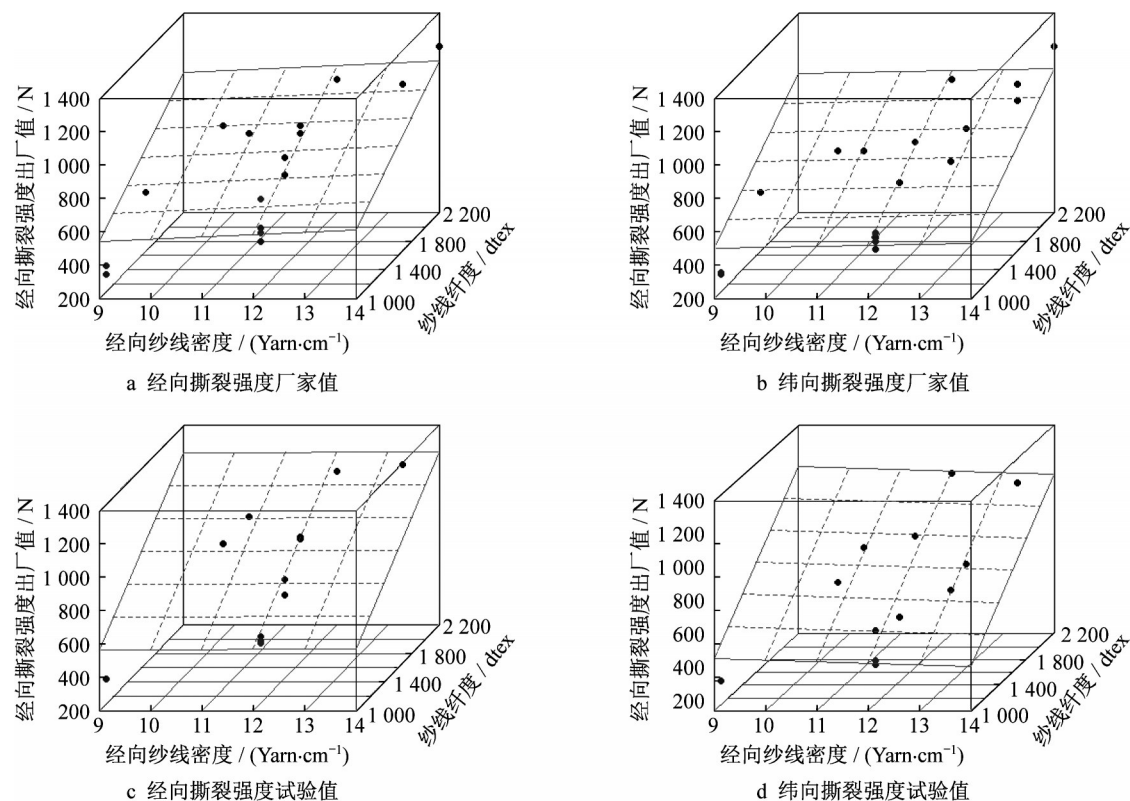


图6 撕裂强度与纱线密度、纱线纤度的回归平面
Fig. 6 Regression plane of tearing strength with yarn density and fineness

4 结论

基于多元统计的经典分析方法对涂层织物类膜材的力学性能进行了研究,得到的主要结论如下:

(1)膜材经、纬向抗拉强度和撕裂强度指标均分别具有显著的相关性,相关系数大于0.9,呈现很好的线性相关;选择抗拉强度和断裂延伸率作为主要影响因素,分别提出了经纬向撕裂强度的回归公式,

为开展膜材撕裂强度相关研究提供支撑。

(2)验证了规范将80%作为膜材纬向强度与经向强度比值下限的合理性,并提出可以增加涂层织物类膜材纬向撕裂强度值应满足不低于经向撕裂强度的75%的判别条件。规范中对于膜材撕裂强度不应小于相应抗拉强度值的7%或8%,本文通过统计分析认为规范比值限定偏于保守,建议将该比值增加到10%。

(3)膜材抗拉强度及撕裂强度均随着织物截面、膜材克重及厚度的增加而线性增加。选取织物克重和涂层克重为主要影响因素,提出了膜材经、纬向抗拉强度的二元线性回归公式;同时,对经、纬向撕裂强度与纱线密度和纱线纤度之间的关系进行了回归分析,提出相应的回归公式,便于优化膜材料产品设计,合理选取工艺参数以指导生产。

本文已经尽可能多地查找、收集不同种类膜材的强度试验数据及其规格指标,统计各类膜材数据指标共计55组,在今后研究中会进一步积累相关试验数据,在本文线性回归的基础上,开展多元非线性回归分析的研究工作,并结合细观力学相关研究内容,提高回归分析的可解释性,以得到更丰富的结论。

作者贡献声明:

杨 彬:方案设计与论文撰写。

吴梦琳:实验开展、数据处理与论文撰写。

张其林:论文指导。

霍震霆:实验开展、数据处理。

赏莹莹:实验开展、数据处理。

参考文献:

- [1] 中国工程建设协会. 膜结构技术规程:CECS 158: 2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification of membrane structures: CECS 158: 2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [2] 张营营, 张其林, 吴明儿. 膜材料性能及其对结构的影响[J]. 空间结构, 2012, 18(2): 70.
ZHANG Yingying, ZHANG Qilin, WU Minger. Material properties of membrane and its influence on structural behaviors. [J]. Spatial Structures, 2012, 18(2): 70.
- [3] 刘倩楠. 基于ABAQUS的机织物拉伸力学性能分析[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
LIU Qiannan. Analysis of tensile mechanical properties of woven fabrics based on ABAQUS [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [4] 包晗, 张旭波, 吴明儿. PVC涂层聚酯纤维膜材撕裂性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 631.
BAO Han, ZHANG Xubo, WU Minger. Experimental study on tearing behavior of PVC coated polyester fiber membrane [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 631.
- [5] 张旭波, 吴明儿, 包晗. 涂层织物类膜材的偏轴梯形撕裂行为[J]. 建筑材料学报, 2019, 24(1): 121.
ZHANG Xubo, WU Minger, BAO Han. Off-axial trapezoid tearing behaviors of coated fabrics [J]. Journal of Building Materials, 2019, 24(1): 121.
- [6] MOBARAK Hossain M. A review on different factors of woven fabrics' strength prediction[J]. Science Research, 2016, 4(3): 88.
- [7] 何琼, 陈南梁, 席时平, 等. 机织物增强压延柔性复合材料的撕裂和剥离性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2007, 33(1): 130.
HE Qiong, CHEN Nanliang, XI Shiping, *et al.* Tearing and peeling performances of calendered flexible composites reinforced with weaving fabrics [J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2007, 33(1): 130.
- [8] 郭晓霞. 几种多元统计分析方法的研究及其简单应用[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
GUO Xiaoxia. Some multivariate statistical analysis methods and its simple applications [D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2014.
- [9] 高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
GAO Huixuan. Application of multivariate statistical analysis [M]. Beijing: Peking University Press, 2005.
- [10] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2004.
HE Xiaoqun. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2004.
- [11] 高成军. 织物膜材双轴试验方法、膜材试验及力学行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
GAO Chengjun. Biaxial test methods, experiments and mechanical behavior of fabric membranes [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [12] 李阳. 建筑膜材料和膜结构的力学性能研究与应用[D]. 上海: 同济大学, 2007.
LI Yang. Study and applications on mechanical properties of membrane materials and structures [D]. Shanghai: Tongji university, 2007.
- [13] 刘莎莎, 张杨, 张毅刚, 等. 聚酯纤维类膜材分级的研究[C]//庆贺刘锡良教授执教六十周年暨第十一届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: [S. n.], 2011: 587-594.
LIU Shasha, ZHANG Yang, ZHANG Yigang, *et al.* Study on classification of polyester fiber membrane materials [C]//The 60th Anniversary of Professor Liu Xiliang's Teaching and the 11th National Symposium on Modern Structural Engineering. Tianjin: [S.n.], 2011: 587-594.
- [14] 张杨, 张毅刚, 刘莎莎. 膜材经向拉伸性能数值模拟[J]. 河南科学, 2011(5): 58.
ZHANG Yang, ZHANG Yigang, LIU Shasha. The numerical simulation of warp membrane tensile test [J]. Henan Science, 2011(5): 58.
- [15] 章辉. 膜结构建筑用纺织材料的性能评价研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2008.
ZHANG Hui. Study on performance evaluation of textile materials used in membrane structure construction field [D]. Tianjing: Tianjing University, 2008.