

贴合工艺对篷盖类柔性复合材料力学性能的影响

周 阳^a, 丁新波^a, 韩 建^{a,b}, 徐国平^a, 于 斌^a

(浙江理工大学, a. 材料与纺织学院, b. 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 杭州 310018)

摘 要: 采用二次通用旋转组合设计,以温度、压力和时间为因子,研究篷盖类柔性材料的贴合工艺,分析其拉伸性能与剥离性能,分别建立断裂强度、断裂伸长率及剥离强度的数学模型。结果表明:温度是影响复合材料最终性能的最显著因素;在温度 165℃、压力 3 MPa、时间 160 s 条件下贴合而成的复合材料综合性能最优。

关键词: 篷盖材料; 贴合工艺; 力学性能; 回归设计

中图分类号: TS106.64 **文献标识码:** A

0 引 言

柔性复合材料是指以高强涤纶工业丝、玻璃纤维等原料经纺织加工成织物,再通过涂层、压延或层合工艺使聚氯乙烯等高聚物膜形成于织物表面而制得的一类复合材料。作为第二代柔性复合材料的篷盖类柔性复合材料虽然从 1990 年左右才开始受重视,由于总体上具有很好的力学和热学性能,且经过特殊处理后具有高强、轻质、不燃、自洁、透光耐久性等优异性能,广泛应用于建筑、广告灯箱及农用材料等领域,是产业用涂层织物中需求量最大的品种之一^[1]。

篷盖类柔性复合材料在使用过程中,其拉伸与剥离性能是最受研究者关注和重视的两个力学性能指标,直接关系到其使用寿命。然而柔性复合材料在使用过程易受到气候条件、大气污染物及外力场等条件的影响,加速面层 PVC 薄膜的老化,以及贴合过程存在的一些问题而易导致柔性复合材料局部出现基材与 PVC 薄膜分离,严重影响其使用寿命^[2-6]。

因此,本文采用二次通用旋转组合设计试验方法对篷盖材料贴合工艺进行研究,分析工艺参数对材料拉伸性能与剥离性能的影响,探讨工艺参数与断裂强度、断裂伸长率及剥离强度的回归方程,优化工艺参数,以提高复合材料在恶劣环境的使用寿命,

为篷盖类柔性复合材料的开发提供理论依据。

1 实验部分

1.1 实验原料

聚氯乙烯(PVC)薄膜,平方米克重为 165 g/m²; 基材:涤纶平纹织物(55.6 tex×55.6 tex,28 根×28 根/10 cm)。

1.2 试样制备

试验采用平板热熔层压法,将基材夹在表里两层 PVC(聚氯乙烯)膜片之间,在一定条件下经过平板硫化机(湖州星力橡胶机械制造有限公司,平板尺寸 350 mm×350 mm)贴合得到所需的柔性复合材料。

本文采用 3 因子二次通用旋转组合设计方法^[7]建立实验方案,并对实验数据进行处理,建立下列数学模型:

$$y = b_0 + b_i \sum_{i=1}^m x_i + b_{ij} \sum_{i \neq j} x_i x_j + b_{ii} \sum_{i=1}^m x_i^2$$

选取的 3 因子分别为:温度、压力和时间,其因子水平编码表和结构矩阵表分别如表 1、表 2 所示。

1.3 实验仪器及测试方法

拉伸性能测试:采用标准 BS3424-21—1993^[8],在 YG028-3000 型电子强度仪以等速拉伸(CRE)测试方法进行拉伸性能测试,试样尺寸 200 mm×

30 mm,夹头间距 100 mm,拉伸速度 100 mm/min。

剥离性能测试:根据标准 GB/T2791—1995^[9],在 YG028-3000 型电子强度仪采用等速拉伸测试方法进行剥离性能测试,试样尺寸 200 mm×30 mm,测试前沿试样长度方向将膜材的一侧薄膜预先剥离 30 mm,预加张力 2 N,拉伸速度 100 mm/min。

表 1 因素水平编码表

编码值 z_i	-1.682	-1	0	1	1.682
温度/℃	160	162	165	168	170
压力/MPa	1	2	3	4	5
时间/s	120	144	180	216	240

表 2 结构矩阵表

试验号	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1
3	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1
4	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
5	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
7	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1
8	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
9	1.682	0	0	0	0	0	2.828	0	0
10	-1.682	0	0	0	0	0	2.828	0	0
11	0	1.682	0	0	0	0	0	2.828	0
12	0	-1.682	0	0	0	0	0	2.828	0
13	0	0	1.682	0	0	0	0	0	2.828
14	0	0	-1.682	0	0	0	0	0	2.828
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2 结果与分析

2.1 试验测试结果

根据标准 BS3424-21—1993 与 GB/T2791—1995 分别测试膜材的断裂强度、断裂伸长率与剥离强度,结果如表 3 所示。

2.2 回归结果与分析

2.2.1 回归结果计算

回归方程的回归系数利用最小二乘法计算公式 $b = (x'x)^{-1}(x'y)$ 求解,其中, x 是由结构矩阵构成的矩阵; x' 为 x 的转置矩阵($(x'x)^{-1}$ 为设计的相关矩阵,常用 A^{-1} 来表示, A 是信息矩阵); y 为测试后各性能指标值构成的矩阵($(x'y)$ 为常数项矩阵,常用 B 来表示)。经二次通用旋转回归分析计算,得到回归方程分别如下:

膜材断裂强度 y_1 的回归方程:

$$y_1 = 1265.79 - 14.91x_1 - 2.14x_2 - 15.56x_3 - 20.74x_1x_2 - 7.96x_1x_3 + 30.12x_2x_3 + 3.83x_1^2 - 31.00x_2^2 - 8.96x_3^2 \tag{1}$$

表 3 不同工艺参数的试样的测试结果

试验号	断裂强度 /(N/3 cm)*	断裂伸长 率/%	剥离强度 /(N/3cm)*
1	1 203.64	24.70	12.91
2	1 187.54	24.24	13.30
3	1 175.28	24.94	13.17
4	1 311.20	26.04	11.76
5	1 285.84	26.32	12.14
6	1 269.46	26.28	10.77
7	1 206.10	26.27	10.01
8	1 278.62	26.72	8.53
9	1 300.76	25.11	13.61
10	1 325.30	26.90	10.36
11	1 221.32	25.34	14.34
12	1 224.02	25.30	9.33
13	1 269.02	25.90	13.50
14	1 290.72	26.28	10.36
15	1 306.20	27.20	13.12
16	1 320.38	27.00	13.37
17	1 293.90	26.72	12.72
18	1 275.08	26.44	13.60
19	1 283.44	27.14	12.48
20	1 287.92	26.53	13.39

* 3 cm 为膜的宽度

膜材断裂伸长率 y_2 的回归方程:

$$y_2 = 26.07 - 0.65x_1 - 0.17x_2 - 0.12x_3 - 0.21x_1x_2 - 0.03x_1x_3 + 0.26x_2x_3 - 0.24x_1^2 - 0.50x_2^2 - 0.20x_3^2$$

(2)

膜材剥离强度 y_3 的回归方程:

$$y_3 = 12.14 + 1.11x_1 + 1.03x_2 + 0.67x_3 - 0.39x_1x_2 - 0.23x_1x_3 - 0.24x_2x_3 + 0.37x_1^2 - 0.43x_2^2 - 0.39x_3^2$$

(3)

2.2.2 回归方程和回归系数的显著性检验

回归方程和回归系数的显著性检验的结果如表 4 所示。

表 4 试验结果方差分析

差异源	SS			df	MS			F			显著性		
	断强	断伸	剥离强		断强	断伸	剥离强	断强	断伸	剥离强	断强	断伸	剥离强
X_1	3 038.00	5.52	16.82	1	3 038	5.52	16.82	4.55	29.60	28.71	*	*	*
X_2	62.69	0.41	14.54	1	62.69	0.41	14.54	0.10	2.19	24.83			*
X_3	3 306.16	0.21	6.13	1	3 306.16	0.21	6.13	4.95	1.12	10.46	*		*
X_1X_2	3 439.53	0.34	1.20	1	3 439.53	0.34	1.20	5.15	1.83	2.042	*		
X_1X_3	506.893	0.01	0.42	1	506.89	0.01	0.42	0.76	0.04	0.72			
X_2X_3	7 255.40	0.53	0.45	1	7 255.40	0.53	0.45	10.86	2.82	0.77	*		
X_1^2	214.86	0.81	2.00	1	214.86	0.81	2.00	0.33	4.35	3.41		*	*
X_2^2	14 109.52	3.66	2.67	1	14 110.00	3.66	2.67	21.12	19.62	4.55	*	*	*
X_3^2	1 178.00	0.60	2.22	1	1 179.00	0.60	2.22	1.77	3.23	3.78		*	*
回归	33 111.00	12.08	46.25	9	3 679.00	1.34	5.14	5.51	7.20	8.78	*	*	*
残差	6 681.11	1.86	5.86	10	668.11	0.19	0.59						
总和	39 792.10	13.94	52.28	$n-1=19$									

注: $F_{0.05}(1,10)=4.96,F_{0.05}(9,10)=3.02$

2.2.3 回归结果分析

由表 4 可知,各回归方程显著性检验 $F_{\text{断强}}=5.51,F_{\text{断伸}}=7.20,F_{\text{剥离强}}=8.78$ 均大于 $F_{0.05}(9,10)=3.02$,回归显著,说明工艺参数对复合材料的影响显著。经检验各回归系数,除了方程(1)的 $b_2、b_{13}、b_{11}、b_{33}$,方程(2)的 $b_2、b_3、b_{12}、b_{13}$ 和方程(3)的 $b_{12}、b_{23}、b_{13}$ 外,其它回归系数都在不同程度上具有显著性。剔除不显著项后,建立工艺参数对复合材料断裂强度、断裂伸长率及剥离强度的回归方程:

膜材断裂强度 y_1 的回归方程:

$$y_1 = 1286.96 - 14.91x_1 - 15.56x_3 - 20.74x_1x_2 + 30.12x_2x_3 - 31.00x_2^2$$

(4)

膜材断裂伸长率 y_2 的回归方程:

$$y_2 = 26.71 - 0.65x_1 - 0.24x_1^2 - 0.50x_2^2 - 0.20x_3^2$$

(5)

膜材剥离强度 y_3 的回归方程:

$$y_3 = 12.95 + 1.11x_1 + 1.03x_2 + 0.67x_3 - 0.37x_1^2 - 0.43x_2^2 - 0.39x_3^2$$

(6)

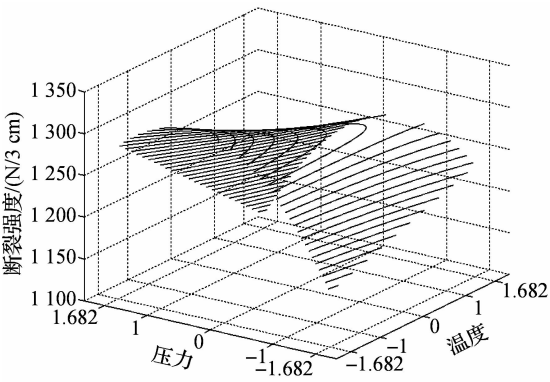
由回归方程(4)的显著性可知,复合材料的断裂强度与贴合工艺的温度、压力和时间有一定的关联;影响复合材料断裂强度的因素依次是温度与时间的 1 次项、温度与压力的交互项、压力与时间的交互项

以及压力的 2 次项,且只有压力与时间的交互项对断裂强度的影响是正效应。因为在贴合工艺中,温度的升高会加速 PVC 的分解,压力增大则增加膜-基布及膜-膜之间的接触面积,起到类似于温度的效果,时间的延长使膜-基材及膜-膜之间有更充足的时间形成新的粘结层。

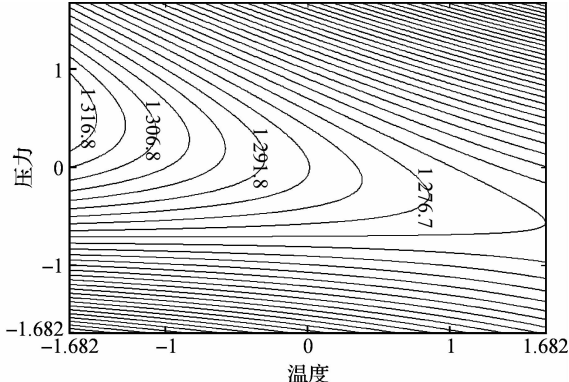
从回归方程(5)可以看出,复合材料的断裂伸长率主要与贴合工艺的温度的 1 次项,温度、压力和时间 的 2 次项有关。薄膜与基材贴合之后的断裂伸长率减小的原因是:a)贴合温度高(不低于 155℃),涤纶基材热收缩现象明显;b)PVC 薄膜使基材定型,在拉伸时基材纱线的移动空间减少。

由回归方程(6)可知,影响复合材料剥离强度的因素为温度、压力和时间 的 1 次项及其各自的 2 次项,且 1 次项为正效应,而 2 次项为负效应。这是因为,温度的升高、压力的增大及时间的延长虽然可以使 PVC 薄膜更容易渗透到纱线中,且两层薄膜之间更易形成相互渗透区,但长时间的处理对基材及 PVC 薄膜的力学性能会产生负面影响。

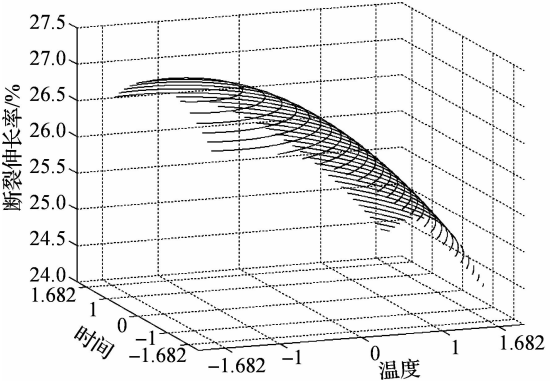
由回归方程(4)、(5)和(6)对膜材的断裂强度、断裂伸长率及剥离强度所作的三维等值图及二维等值线如图 1 所示。



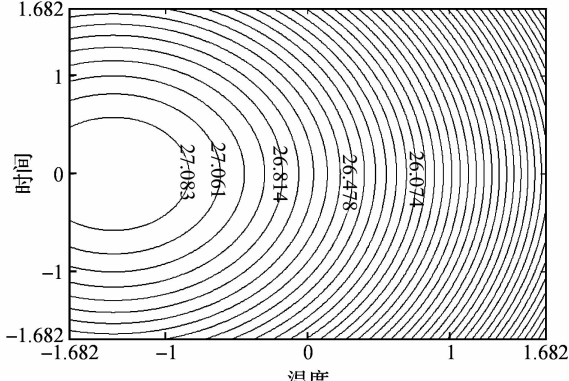
(a) 断裂强度三维等值图



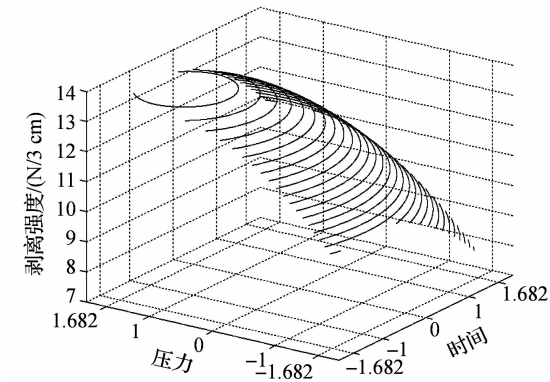
(b) 断裂强度等值线



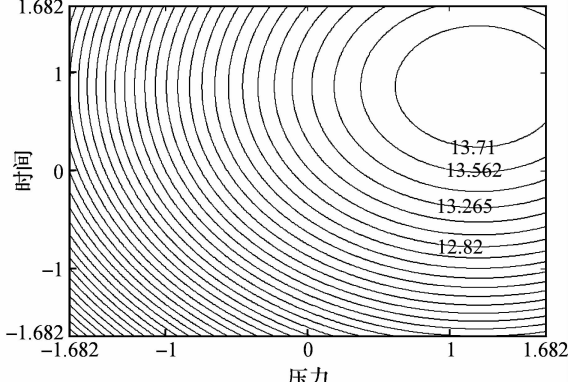
(c) 断裂伸长率三维等值图



(d) 断裂伸长率等值线



(e) 剥离强度三维等值图



(f) 剥离强度等值线

注：温度、压力、时间的极限值分别为-1.682,1.682,中间值为线性插值

图1 膜材相关性能的三维及二维等值图

图1(a)、(b)为 $x_1=0$ 的断裂强度的三维及二维图。图中可以看出,时间不变,膜材的断裂强度随压力的增加先增大后减小,在压力为3 MPa左右达最大值;压力不变,膜材的断裂强度随时间的增加而减小;压力与时间同时变化时表现出明显的交互作用。图1(c)、(d)为 $x_2=0$ 的断裂伸长率的三维及二维图,图中可知,温度不变,膜材的断裂伸长率随时间的增加先增大后减小;时间不变,膜材的断裂伸长率随温度的增加而减小。图1(e)、(f)为 $x_1=0$ 的剥离强度的三维及二维图,压力不变,膜材的剥离强度随时间的增加而增大;时间不变,膜材的剥离强度

随压力的增加而增大。

2.3 最优工艺参数

由于篷盖类柔性复合材料属于张拉式复合材料,故其断裂强度是主要考核指标,且要保证适度的断裂伸长率。综合分析公式(4)、(5)、(6)及图1,最终确定最优的贴合工艺参数为:温度 165℃、压力 3 MPa、时间 160 s。

3 结 论

a)根据二次通用旋转组合设计方法,以贴合工艺参数温度、压力和时间三个因子,建立了与篷盖

材料的断裂强度、断裂伸长率及剥离强度相关的三个数学模型。

b)通过复合材料的断裂强度、断裂伸长率及剥离强度的三维等值曲面图和二维等值图分析得出了贴合工艺的温度、压力和时间对复合材料的影响:温度是影响柔性复合材料最终性能的最显著因素。温度取 0 水平时,压力的变化对复合材料断裂强度的影响较时间更为显著;时间的变化对复合材料剥离强度的影响更为明显;压力为 0 水平时,温度的变化对复合材料断裂伸长率的影响较大。

c)确定了较为合理的贴合工艺参数:温度 165℃、压力 3 MPa、时间 160 s。

参考文献:

[1] 朱怡俊,陈南梁. 篷盖类柔性复合材料的现状和发展[J]. 产业用纺织品, 2004(4): 7-10.

[2] 严 慧,艾 威. 膜结构常见疵病、损伤及防治[J]. 空间结构, 2007, 13(2): 26-31.

[3] 徐长亚,叶雪康,陈连星,等. 现代建筑用 PVC 膜结构复合材料工艺研究[J]. 产业用纺织品, 2008(6): 37-39.

[4] 矫卫红,陈南梁. 篷盖类柔性复合材料的现状和发展[C]. 2005 上海国际纺织品和非织造布研讨会及第四届高新技术在产业用纺织品(防护材料和新型柔性材料)领域推广应用研讨会论文集. 上海: 全国产业用纺织品科技情报站, 2005: 103-105.

[5] Mathews G. PVC production, properties and uses: Chapters 6, 7[M]. London: The Institute of Materials, 1996.

[6] Razaka H A, Chuua C S, Toyodab H. Weatherability of coated fabrics as roofing materials in tropical environment[J]. Building and Environment, 2004, 39: 87-92 .

[7] 郁崇文,汪 军,王新厚. 工程参数的最优化设计[M], 上海, 东华大学出版社, 2003: 108-128.

[8] BS3424-21—1993 涂层织物拉伸性能及断裂伸长率测试[S].

[9] GB/T2791—1995 胶黏剂 T 剥离强度实验方案[S].

The Influence of Process Factors on the Mechanical Properties of Flexible Composite Materials

ZHOU Yang^a, DING Xin-bo^a, HAN Jian^{a, b}, XU Guo-ping^a, YU Bin^a

(Zhejiang Sci-Tech University, a. School of Materials and Textiles; b. The Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The quadratic general rotary unitized design of three factors, the temperature, the pressure and the time, is used to study the influence of process factors on the mechanical properties of flexible composite materials. The tensile property and peeling performance are tested, and the mathematical models about breaking force, elongation at break and peel strength are built. The results show that temperature is the most significant factor influencing the mechanical properties of flexible composites, and the optimal condition of process factors are as follows:the temperature is 165℃, the pressure is 3 MPa, and the time is 160 s.

Key words: flexing composite materials; compound process; mechanical property; regression design
(责任编辑: 张祖尧)