

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.09.018

# 高光谱成像技术预测农用乙烯-乙酸乙烯酯塑料棚膜撕裂强度

林萍, 陈永明

(盐城工学院电气工程学院, 江苏盐城 224051)

**摘要:** 结合近红外高光谱成像技术和化学计量学方法快速预测农用乙烯-乙酸乙烯酯塑料 (EVAC) 棚膜的撕裂强度保持率。采用高光谱仪获取 EVAC 棚膜在 988.44~1 679.68 nm 波长范围内的近红外高光谱曲线原始特征数据, 利用冲击试验机获取棚膜样本的撕裂强度保持率, 采用 Savitzky-Golay、变量正态化法、一阶导数法 (1<sup>st</sup>-Deriv) 和多变量漂移校正法对采集到的高光谱特征数据进行预处理, 然后采用随机蛙跃和连续交替投影算法从中选择特征波长作为变量, 最后通过支持向量机回归算法建立反映棚膜样本内部结构特性的特征光谱曲线与撕裂强度保持率相关性模型并通过该模型对棚膜的撕裂强度保持率进行了预测和验证。实验结果显示, 基于 1<sup>st</sup>-Deriv 预处理的连续交替投影-支持向量机回归模型获得最优的预测效果, 对应的建模集和预测集的相关系数平方百分数 ( $r^2$ ) 分别为 93.57% 和 88.61%, 比仅用支持向量机回归模型的  $r^2$  分别提高了 1.57% 和 1.24%, 相应的均方根误差分别下降了 0.116 和 0.134。该模型的建立为快速且准确地监测农用 EVAC 棚膜品质提供了重要的技术手段。

**关键词:** 乙烯-乙酸乙烯酯塑料棚膜; 撕裂强度; 保持率; 高光谱成像; 特征波长; 预测; 模型

**中图分类号:** S21    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3539(2018)09-0100-06

## Application of Hyperspectral Imaging Technology on Predicting Tearing Strength of Agricultural Ethylene-Vinyl Acetate Plastic Greenhouse Films

Lin Ping, Chen Yongming

(College of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

**Abstract :** The combination of near infrared hyperspectral imaging technology and chemometrics algorithms was employed to predict the tearing strength retention rate of agricultural ethylene-vinyl acetate plastic (EVAC) greenhouse films quickly. The hyperspectral imaging device was used to gather the raw characteristic data from near infrared hyperspectral curves of EVAC films within the scope of wave length between 988.44 nm and 1 679.68 nm. The tearing strength retention rates of EVAC films were evaluated by using impact testing machine. The raw characteristic data was preprocessed by using the Savitzky-Golay, standard normal variate, first derivative (1<sup>st</sup>-Deriv) and multiplicative scatter correction algorithms. The algorithms of random frog and successive projections algorithm (SPA) were used to select the sensitive bands from the preprocessed data as variable. A correlation model between the characteristic spectroscopic curves which can reflect the inner structure characteristic of the EVAC films and the tearing strength retention rates was built up by using the support vector machine (SVM) regression algorithms, and the prediction and verification for the tearing strength retention rate of the EVAC films were done through the model. The results show that, the SPA-SVM model based on 1<sup>st</sup>-Deriv preprocessing generates the best prediction results, the square percentage of correlation coefficient ( $r^2$ ) of corresponding modeling set and prediction set are 93.57% and 88.61% respectively, which increase by 1.57% and 1.24% compared with  $r^2$  of simple SVM model and the root mean square error reduce by 0.116 and 0.134. The building of the model can provide an important means for monitoring the quality of agricultural EVAC greenhouse films quickly and precisely.

**Keywords :** ethylene-vinyl acetate plastic greenhouse film ; tearing strength ; retention rate ; hyperspectral imaging ; sensitive bands ; prediction ; model

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (31601227, 31501221), 江苏省自然科学基金面上项目 (BK20161310)

**通讯作者:** 陈永明, 博士, 副教授, 主要研究方向为光谱分析、农业智能系统 E-mail: binglvcha007@126.com

**收稿日期:** 2018-06-11

**引用格式:** 林萍, 陈永明. 高光谱成像技术预测农用乙烯-乙酸乙烯酯塑料棚膜撕裂强度 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(9):100-105.

Lin Ping, Chen Yongming. Application of hyperspectral imaging technology on predicting tearing strength of agricultural ethylene-vinyl acetate plastic greenhouse films[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(9):100-105.

现阶段农田大棚棚膜覆盖技术为农作物构建了一个湿度、温度适宜的生长环境,膜覆大棚具有可以在干燥气候条件下锁住大棚内空气中的水分和提高二氧化碳浓度等功能,还可有效抵御外界寒冷空气和虫害对作物的威胁。实践证明,一些在农田大棚下生长的农作物如草莓、辣椒、黄瓜、番茄等的果实产量增加率一般都会提高到28%以上<sup>[1]</sup>。目前,农业实践生产中主要利用聚氯乙烯、线型低密度聚乙烯与乙烯-乙酸乙烯酯塑料(EVAC)等有机高分子制成的塑料大棚。其中,EVAC棚膜使用最为广泛,原因是其具有良好的透光性能,可以使温室中的农作物叶片充分完成光合反应;可以有效抵御在太阳辐射和农田中农药、水汽的侵蚀,寿命相对较长;另外破裂的薄膜通过再加工还能继续使用,可以有效保护环境,因此在现代农田生产过程中EVAC棚膜被广泛研发与推广应用<sup>[2]</sup>。

现阶段生产EVAC棚膜给企业带来了丰厚的效益,导致相关生产和加工企业不断涌现,各个企业使用的原材料、加工设备和加工工艺不尽相同,由此导致相关棚膜产品质量良莠不齐。相关农业检测机构和农户如何快速确定市场上繁多的EVAC棚膜材料质量成为一大难题。其中,棚膜材料的撕裂强度是衡量EVAC棚膜质量的重要参数之一,经过一段时间使用后棚膜撕裂强度会降低,这容易使EVAC棚膜出现破损现象,从而对农业生产造成困扰,因而需要经常监测EVAC棚膜撕裂强度的变化情况,以掌握棚膜的使用情况。目前农机机构使用的检测方法是利用物理破坏有损撕裂实验,该方法需要漫长的测试周期,因此无法满足目前市场上品牌繁多的棚膜快速测试需求<sup>[3]</sup>。高光谱成像技术耦合了经典的成像和光谱技术,因此它具备了成像和光谱的双重功能,这种双重功能使得高光谱技术可以同时获取被测物质的物理及化学属性。笔者利用高光谱仪来快速获取EVAC棚膜材料高光谱特征曲线,利用化学计量学方法来关联其撕裂强度与高光谱特征曲线相关数据<sup>[4]</sup>,最终通过建立的基于高光谱响应的化学计量学预测模型实现对农用EVAC棚膜材料撕裂强度保持率的快速、准确预测。

## 1 实验部分

### 1.1 实验样本

实验样本为来自山东潍坊、江苏苏州和广东顺德的3家厂商提供的EVAC棚膜产品。测试对象安装在盐城大丰某大队农场中,1年后取下送回实

验室进行高光谱扫描实验和撕裂强度测试。测试棚膜的样本总数为150张,其中每个厂商的测试样本50张,每类样本随机抽取40个对象用于建立预测模型,其余10个对象被用于验证模型性能。

### 1.2 高光谱成像系统及光谱数据获取原理

实验用高光谱成像系统组件主要包括:美国Dolan Jenner Industries公司生产的Fiber-Lite DC950型线性照射源、芬兰Spectral Imaging公司生产的N17E-QE型近红外高光谱仪(图像分辨率大小为310像素×260像素,光谱分辨率为5 nm),中国台湾Isuzu Optics公司生产的IRCP0076型水平移动载物电控平台。将上述设备都放在无光的铁箱中,调整物镜铅锤高度为286 mm,调整高光谱相机曝光时间为2 610  $\mu$ s,调整载物电控平台恒定运动速度为32.5 mm/s。获取EVAC棚膜高光谱数据的原理如图1所示。通过线光源照射EVAC棚膜来获取连续的反射光谱信息,通过移动载物电控位移平台来移动EVAC棚膜,从而改变线性光源作用于棚膜的位置,利用近红外高光谱仪来获取棚膜连续不同部位反射的线性光谱信息,计算机通过数据通讯电缆获取到高光谱仪中采集到光谱信息,最终存储到计算机磁盘空间中。

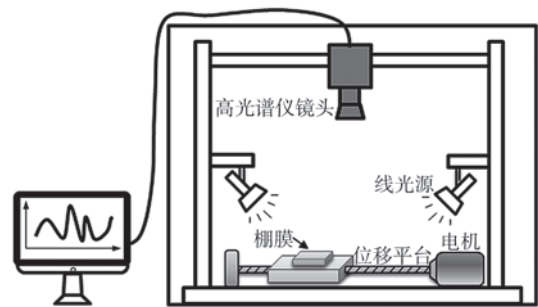


图1 获取EVAC棚膜高光谱数据的原理图

### 1.3 撕裂强度测试

撕裂强度按轻工行业标准QB/T 1130-1991《塑料直角撕裂性能试验方法》进行测试<sup>[5]</sup>,撕裂强度分析仪采用吴忠市材料试验机有限公司提供的XJ-300A型塑料冲击试验机。仪器使用的主要技术参数为:冲击能量7.35 J、冲击速度3.8 m/s、预扬角150°、冲击刀刃圆角半径(2±0.5) mm、夹角30°、钳口圆角半径1 mm、摆轴轴线至试样中心距离395 mm。

## 2 理论与算法

### 2.1 光谱数据预处理

在获取扫描的高光谱数据中由于各种原因会

混入噪声信号,为了有效遏制原始信号中噪声的干扰影响,采用 Savitzky-Golay (SG)、变量正态化法 (SNV)、一阶导数法 (1<sup>st</sup>-Deriv) 和多变量漂移矫正法 (MSC) 来有效遏制散射光、散杂光和各种其它介质光等对获取到的原始特征信号的干扰<sup>[6]</sup>。

## 2.2 特征波长提取

采用随机蛙跃<sup>[7]</sup>算法和连续交替投影<sup>[8]</sup>算法来提取特征波长。

### (1) 随机蛙跃算法简介。

随机蛙跃算法是一种类似于可逆跳转马尔可夫链蒙特卡洛的算法,通过在模型空间中模拟一条服从稳态分布的马尔可夫链来计算每个变量的被选概率,其具体实现步骤如下:

①初始化迭代次数、初始变量集的变量数、正态分布的方差控制因子、接受阈值等参数;

②随机选择初始变量集;

③从正态分布中产生随机数作为下一次迭代中新变量集的变量个数;

④根据交互验证均方根误差拒绝或保留新变量集;

⑤重复步骤①~步骤④,对每次出现的变量的出现概率取平均值。

若变量对建模越重要,则其出现的概率就越大,进而根据概率大小来选择变量。

### (2) 连续交替投影算法简介。

连续交替投影算法利用投影向量的技巧来发现包含最小噪声余量的信息组分,从而减小信息组分的共线性,进而减少特征向量建模的维度。设  $x_{p(0)}$  为起始输入向量,提取的特征波长个数为  $N$ ,光谱矩阵列数为  $i$ ,则实现步骤如下所示。

①随机选择 1 列光谱矩阵,赋建模集的第  $i$  列给  $x_i$ ,记为  $x_{p(0)}$ ;

②记候选列向量位置集合为  $\beta$ ,则有  $\beta=\{i, 1 \leq i \leq I, i \notin \{p(0), \dots, p(n-1)\}\}$ ,其中  $I$  为光谱矩阵列向量的个数;

③分别计算  $x_i$  剩下列向量的投影 ( $\phi$ );

$$\phi x_i = x_i - (x_i^T x_{p(n-1)}) x_{p(n-1)} (x_{p(n-1)}^T x_{p(n-1)})^{-1}, i \in \alpha$$

④令  $p(n)=\arg\max\{\phi x_i\}$ ;

⑤令  $x_i=\phi x_i$ ;

⑥  $n=n+1$ ,若  $n < N$ ,则返回到②。

最后将提取到的变量作回归分析,获得的最小预测标准偏差对应的特征变量即是选择的特征波长。

## 2.3 建模方法

通过支持向量机回归方法来建立高光谱特征数据与撕裂强度互相关联的模型。支持向量机回归建模的总体思路是通过非线性函数将原始特征变量投影高维 Hilbert 空间中,然后在此 Hilbert 空间中进行回归运算。支持向量机模型给出  $N$  个变量的建模集  $\Lambda$ :

$$\Lambda = \{(x_i, y_i) | x_i \in R^p\}_{i=1}^N \quad (1)$$

式 (1) 中,  $x_i$  为高光谱特征输入变量,  $y_i$  为撕裂强度保持率属性值,  $R^p$  表示向量长度为  $p$  的实数集合。支持向量机法利用核函数  $\phi$  将输入变量  $x$  映射到高维核空间中构建线性回归函数  $f_i(x)=\omega_i^T \phi(x)+b_i$  (其中  $b_i$  为第  $i$  个向量映射后的截距),线性回归参数可以利用规划方法来求解:

$$\text{最小化: } \Omega(\omega, \zeta_i) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \lambda \sum \zeta_i \quad (2)$$

受限于:  $1 - \zeta_i \leq \omega_i^T \phi(x) + b_i, 0 \leq \zeta_i$

式中:  $\omega$ ——复杂权重因子;

$\zeta_i$ ——调节系数<sup>[9]</sup>;

$y_i$ ——实际值 (即实测的撕裂强度保持率);

$\lambda$ ——松弛变量<sup>[9]</sup>。

## 2.4 模型评价

以均方根误差 RMSE 和相关系数的平方百分数  $r^2$  用于评估模型性能的优劣<sup>[6]</sup>:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n} \quad (3)$$

$$r^2 = [1 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2] \cdot 100\%$$

式 (3) 中,  $n$  为对象个数,  $y$  表示实测的撕裂强度保持率值,  $\hat{y}$  表示撕裂强度保持率预测值,  $\bar{y}$  表示实测的撕裂强度保持率值的数学希望。建模集和预测集的 RMSE 分别用  $\text{RMSE}_c$  和  $\text{RMSE}_p$  表示,两者的  $r^2$  分别用  $r_c^2$  和  $r_p^2$  表示。

## 2.5 模型预测流程

结合近红外高光谱成像技术和化学计量学方法来快速地预测农用 EVAC 棚膜撕裂强度保持率的流程图如图 2 所示。

首先建立基于高光谱响应的校正模型:输入利用高光谱仪获取的农用 EVAC 棚膜的近红外光谱特征曲线;再对采集到的高光谱特征数据进行预处理;接着采用随机蛙跃和连续交替投影算法来提前指纹特征波段;然后采用支持向量机回归算法建立反映样本内部结构特性的特征光谱曲线与实测撕裂强度互相关联的校正模型。如果建立的校正模型的

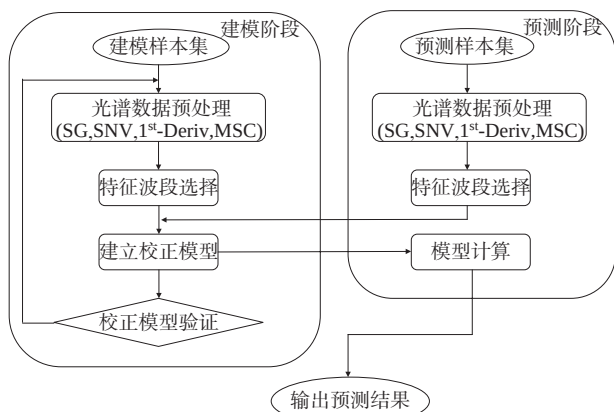


图2 使用高光谱预测农用 EVAC 棚膜撕裂强度保持率的流程图  
预测效果不符合预测要求,重新进行上述建模过程;如果达到建模指标,进入下一步预测阶段。

输入利用高光谱仪获取的未知农用 EVAC 棚膜样本的近红外光谱特征曲线,再对采集到的高光谱特征数据进行预处理,接着提取农用 EVAC 棚膜样本光谱数据的特征波段,最后通过上述建立的模型计算输出撕裂强度保持率预测结果。

模型精度验证过程可通过计算 RMSE 和  $r^2$  来判别模型好坏,如果建模集和预测集的 RMSE 和  $r^2$  偏差小,表明选择的特征波长和建立的预测模型是可行的,可以用于实际的农用 EVAC 棚膜撕裂强度保持率的预测;反之,如果建模集和预测集的 RMSE 和  $r^2$  偏差太大,则需要修正特征波长或者模型相关参数。

## 2.6 模型方法实现

农用 EVAC 棚膜原始高光谱数据预处理(即采用 SG, SNV, 1<sup>st</sup>-Deriv 和 MSC 方法进行数据预处理)环节通过 The Unscrambler X 10 软件来实现;然后,将预处理后的高光谱数据输入到随机蛙跃算法和连续交替投影的 Matlab 软件包中来提取映射撕裂强度的特征波长;最后,将已提取到的棚膜特征光谱输入到支持向量机回归的 Matlab 软件包中建立特征波长与实测撕裂强度保持率之间的预测模型,最终实现农用 EVAC 棚膜撕裂强度保持率快速、准确的预测。

## 3 建模过程与结果分析

### 3.1 棚膜特征高光谱的获得

高光谱影像可以通过一定的对应关系映射成其特征光谱曲线,因此可以通过一定的法则计算不同谱图上特征光谱值。在高光谱图像中设定为面积大小为 129 像素 × 129 像素的感兴趣区域,计算感兴趣区域中所有像素点上的光谱反射率的数学希望,用于此棚膜对象的特征光谱曲线。采用美

国 Exelis Visual Information Solutions 公司研发的 ENVI4.6 软件处理农用 EVAC 棚膜高光谱图,利用式(4)校正采集到的每一幅高光谱图。

$$\Delta = (I_o - I_d) / (I_w - I_d) \quad (4)$$

式中:  $\Delta$ ——矫正后的高光谱图像灰度值;

$I_o$ ——获取的原始高光谱图像灰度值;

$I_d$ ——使用黑板矫正过的高光谱图像灰度值;

$I_w$ ——使用白板矫正后的高光谱图像灰度值。

图3为使用1年后3家不同地区企业研发生产的农用 EVAC 棚膜的特征高光谱曲线。可以看出, EVAC 分子特征高光谱曲线在 1080, 1220, 1450, 1550 nm 附近表现出较明显的吸收峰。其中 1080 nm 附近是 C=C 键伸缩振动吸收带, 1450 nm 附近是有机分子中 O—H 键倍频吸收带, EVAC 本身不含双键且基本不会出现 O—H 键倍频吸收带, 出现这种现象的原因很可能是因为 EVAC 已发生一定程度降解。1220, 1550 nm 附近是有机分子中 C—H 键的二级和一级倍频吸收带<sup>[6]</sup>。

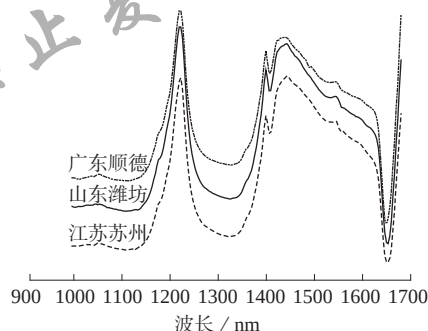


图3 使用1年后3家不同地区企业生产的农用 EVAC 棚膜特征高光谱曲线

### 3.2 棚膜撕裂强度保持率测试

实验农用 EVAC 棚膜在最初安装使用时, EVAC 的分子链之间结构紧密, 农用棚膜内部很难受到氧分子的渗透, 但随着农用棚膜长期在农田环境中的使用, 农用棚膜受到强烈阳光照射、各种农用化学药液、自然雨露等的破坏, 农用棚膜分子逐步被氧分子渗透, 棚膜分子链的自由基与氧分子结合产生过氧化自由基, 进而破坏 EVAC 分子链, EVAC 棚膜内部被逐步降解, 进而影响了农用棚膜的撕裂强度<sup>[10]</sup>。表1为使用1年后3家不同地区的企业研发的农用 EVAC 棚膜的撕裂强度保持率, 可以看出, 使用1年后, 3家的农用 EVAC 棚膜撕裂强度均发生一定程度的下降, 这对棚膜的继续使用会造成一定的影响, 因而需要对棚膜的撕裂强度保持率进行快速、准确的预测。

表1 使用1年后3家不同地区企业研发生产的农用EVAC棚膜的撕裂强度保持率

| 生产企业<br>所在地区 | 撕裂强度保持率/% |       |       |      |
|--------------|-----------|-------|-------|------|
|              | 最大值       | 最小值   | 均值    | 标准偏差 |
| 山东潍坊         | 77.03     | 58.14 | 67.30 | 4.28 |
| 江苏苏州         | 85.61     | 65.37 | 76.51 | 3.97 |
| 广东顺德         | 87.42     | 73.53 | 83.72 | 3.31 |

### 3.3 光谱数据预处理

由于EVAC棚膜样本在高光谱仪扫描过程中易受到随机噪声、表面散射光、杂散光等的影响,获得的原始特征光谱数据一般都含有一定程度的噪声,并呈现出漂移现象,为此采用SG, SNV, 1<sup>st</sup>-Deriv和MSC方法对棚膜原始高光谱数据进行预处理。SG预处理方法是基于最小二乘的卷积滤波算法,通过采用多项式实现滑动窗内的最小二乘拟合来消除原始EVAC棚膜样本漫反射光谱中夹杂的噪声信号;SNV预处理方法是通过改变光谱曲线均值和标准偏差的方法将原始光谱曲线正态分布转为标准正态分布以消除原始EVAC棚膜样本漫反射光谱中夹杂的噪声信号;MSC预处理方法则是在标准光谱的基准下通过修正每样本光谱基线的偏移来有效消除EVAC棚膜样本光谱散射影响,增强了与组分响应变量有关的光谱信息;1<sup>st</sup>-Deriv通过SG卷积求导计算光谱数据的一阶导数来消除原始EVAC棚膜样本漫反射光谱信号基线的漂移现象。表2给出了利用支持向量机回归模型获得的未预处理及上述4种方法预处理后的撕裂强度保持率预测效果。表2的实验结果显示基于1<sup>st</sup>-Deriv的预处理方法可以获得最佳的预测效果,因此之后建模时均利用1<sup>st</sup>-Deriv方法预处理原始高光谱数据。

表2 利用支持向量机回归模型获得的采用不用预处理方法处理后的撕裂强度保持率预测效果

| 预处理方法                  | 建模集        |                   | 预测集        |                   |
|------------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|
|                        | $r_c^2$ /% | RMSE <sub>c</sub> | $r_p^2$ /% | RMSE <sub>p</sub> |
| 未预处理                   | 84.41      | 1.364             | 82.15      | 1.402             |
| SG                     | 86.30      | 1.322             | 85.67      | 1.348             |
| SNV                    | 84.16      | 1.603             | 82.65      | 1.584             |
| 1 <sup>st</sup> -Deriv | 90.28      | 1.218             | 86.23      | 1.350             |
| MSC                    | 88.93      | 1.251             | 84.46      | 1.372             |

### 3.4 特征波长选择

若采用高光谱全波段特征曲线的相应数据作为输入变量会使建立的模型含有大量冗余的信息,进而影响了对后续EVAC棚膜撕裂强度的预测效果,另外全波段建模下程序实现的效率低、使用全波段测量的仪器成本相对较高,不便于推广使用。因此,提出利用随机蛙跃算法和连续交替投影算法来选择合适的特征波长以简化模型并提高模型的预测

效率。

随机蛙跃算法运行时需要随机初始化特征参数,因此算法每次运行后获得的结果都存在一定差异,为了减小随机因素对预测效果的影响,对随机蛙跃算法进行了500次蒙特卡洛实验<sup>[11]</sup>,即将波长出现的概率值统计了500次均值,波长出现概率值越大则表示相应的特征波长对撕裂强度的预测重要程度越大,其中概率阈值的选择是通过回归建模交叉验证的结果进行选择,笔者使用的阈值为0.58,对应选择的10个特征波长为:998.51,1082.47,1109.36,1132.90,1193.46,1233.85,1250.69,1314.72,1429.42,1581.51 nm。

连续交替投影算法能从海量光谱信息中通过连续正交投影有效挖掘出特征变量信息,有效减少原始无关变量的冗余性,连续交替投影算法根据不同波长的均方根误差最小值来确定特征波长,最终获得的9个特征波长为:1035.44,1106.00,1240.59,1270.91,1301.23,1355.18,1382.17,1476.71,1605.20 nm。

### 3.5 基于特征波长的撕裂强度预测

EVAC棚膜全波段高光谱数据输入变量采用1<sup>st</sup>-Deriv预测处理后的数据,响应变量为相应的实测撕裂强度保持率,建模和预测利用支持向量机回归模型来实现。

棚膜高光谱数据首先被进行中心化处理,在支持向量机回归模型中采用高斯核函数  $\text{kernel}(x_i, x_j) = (\alpha \|x_i - x_j\|^2)^\gamma$  将光谱波长范围在988.44~1679.68 nm的近红外高光谱数据投影到高维核空间中,回归模型中松弛变量 $\lambda$ [如式(2)所示]和核参数 $\alpha$ 采用栅格寻优法来估计。首先在最大的栅格里寻找 $(\lambda, \alpha)$ 值,再缩小栅格大小继续寻找 $(\lambda, \alpha)$ 值,参数利用 $N$ 叠交叉法来估计。训练过程中最优的组合参数值还需要通过矫正不敏感损失参数 $\zeta$ [即式(2)的调节系数]的值来获得,当固定参数 $\lambda=77.36$ ,  $\alpha=0.019$ 和不敏感损失参数 $\zeta=0.0157$ 时<sup>[9]</sup>,高光谱数据与撕裂强度的耦合性能最好。然后,将随机蛙跃算法和连续交替投影算法选择出的敏感高光谱波段作为支持向量机回归模型的输入变量,通过支持向量机回归模型预测撕裂强度保持率,不同模型的预测效果如表3所示。表3结果显示,基于特征波长选择的撕裂强度预测效果要优于全波段高光谱预测效果,其中连续交替投影-支持向量机回归模型达到最佳的预测效果,建模集和预测集的

$r^2$  分别为 93.57% 和 88.61%, 比全波段建模的算法分别提高了 1.57% 和 1.24%, 对应的 RSME 分别下降了 0.116 和 0.134。实验分析结果显示建立的基于特征波长选择的连续交替投影算法可以消除原始模型中含有大量冗余的信息, 同时有效提升模型对撕裂强度保持率的预测精度。

表 3 不同回归模型的撕裂强度保持率预测效果

| 回归模型         | 建模集          |                   | 预测集          |                   |
|--------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
|              | $r_c^2 / \%$ | RMSE <sub>c</sub> | $r_p^2 / \%$ | RMSE <sub>p</sub> |
| 支持向量机        | 90.28        | 1.218             | 86.23        | 1.350             |
| 随机蛙跃-支持向量机   | 92.82        | 1.174             | 87.49        | 1.273             |
| 连续交替投影-支持向量机 | 93.57        | 1.102             | 88.61        | 1.216             |

#### 4 结论

(1) 结合高光谱成像技术和化学计量学方法实现对农用 EVAC 棚膜撕裂强度保持率的快速、准确预测。

(2) 光谱数据预处理方法有助于消除原始光谱曲线受到随机噪声、表面散射光、杂散光等的影响, 其中基于 1<sup>st</sup>-Deriv 的预处理方法可获得最优的预测效果。

(3) 用高光谱全波段特征曲线作为输入变量会使建立的模型含有大量冗余的信息, 从而降了模型对撕裂强度保持率的预测精度, 基于随机蛙跃和连续交替投影特征波长选择算法的支持向量机回归模型改进了 EVAC 棚膜撕裂强度保持率的预测精度。

(4) 连续交替投影-支持向量机回归模型达到最佳的预测效果, 建模集和预测集的  $r^2$  分别为 93.57% 和 88.61%, 比全波段建模的方法分别提升了 1.57% 和 1.24%, 相应的 RSME 分别下降了 0.116 和 0.134。

(5) 提出的结合高光谱成像技术和化学计量学方法为实现快速监测农用 EVAC 棚膜产品质量提供重要的技术手段, 具有一定理论和实际意义。

#### 参考文献

- [1] Touchaleaume F, Angellier-Coussy H, César G, et al. How performance and fate of biodegradable mulch films are impacted by field ageing[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2017, 26(6):1-13.
- [2] Chen Haiyang, Teng Yanguo, Lu Sijin, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 512:143-153.
- [3] Bergesen J D, Heath G A, Gibon T, et al. Thin-film photovoltaic power generation offers decreasing greenhouse gas emissions and increasing environmental co-benefits in the long term[J]. Environmental science & technology, 2014, 48(16):9834-9843.
- [4] 彭继宇, 宋星霖, 刘飞, 等. 基于波谱技术的茶树生长与茶叶品质信息快速检测研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(3):775-782.
- [5] 韩志凌, 王丽华, 王新华, 等. 塑料冲击试验机整体式摆锤的研制 [J]. 工程塑料应用, 2013, 41(9):78-82.
- [6] Han Zhiling, Wang Lihua, Wang Xinhua, et al. Development of integrated pendulum of plastic impact testing machine[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(9):78-82.
- [7] Zhu D, Ji B, Meng C, et al. The application of direct orthogonal signal correction for linear and non-linear multivariate calibration[J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems, 2008, 90(2):108-115.
- [8] Cao Q, Miao Y, Feng G, et al. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 112(C):54-67.
- [9] Sun Y, Gu X, Sun K, et al. Hyperspectral reflectance imaging combined with chemometrics and successive projections algorithm for chilling injury classification in peaches[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75:557-564.
- [10] Chang Y W, Hsieh C J, Chang K W, et al. Training and testing low-degree polynomial data mappings via linear SVM[J]. Journal of Machine Learning Research, 2010, 11(11):1471-1490.
- [11] 陈志杰, 郑玉婴, 邱洪峰. TPS/EVA 泡沫复合材料的制备及其阻燃与力学性能 [J]. 化工学报, 2015, 66(3):1221-1227.
- [12] Chen Zhijie, Zheng Yuying, Qiu Hongfeng. Preparation, flame retardant and mechanical properties of TPS / EVA foam composites[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2015, 66(3):1221-1227.
- [13] Lapeyre B, Temam E. Competitive monte carlo methods for the pricing of asian options[J]. Journal of Computational Finance, 2017, 5(1):39-57.

#### 本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿, 同时收取高额注册费、审稿费、版面费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办, 杂志社所在地为山东省济南市, 本刊唯一合法投稿网址为 [www.epa1973.com](http://www.epa1973.com), 本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址, 辨别来电属地, 不要给个人账号汇款, 防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用杂志社)