

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.11.033

近红外光谱结合线性非负回归测定梗丝掺配比例

Detection of mixing proportion of stem by near infrared spectroscopy
combined with linear non-negative regression
coefficient regression method

刘 静¹ 胡建西¹ 杨芳芳² 高 辉¹ 杨盼盼¹

LIU Jing¹ HU Jian-xi¹ YANG Fang-fang² GAO Hui¹ YANG Pan-pan¹

(1. 云南同创检测技术股份有限公司, 云南 昆明 650106; 2. 红云红河烟草(集团)有限责任公司, 云南 昆明 650231)

(1. Yunnan Tongchuang Detecting Technique Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650106, China;

2. Hongyun-Honghe Tobacco (Group) Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650231, China)

摘要:目的:建立成品烟丝中梗丝含量的近红外光谱快速测定方法。方法:以掺配不同比例梗丝(5%, 8%, 11%, 14%)的成品烟丝为试验对象,分别采集纯梗丝、纯叶丝及掺配不同比例梗丝烟丝样品的近红外光谱信息,采用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)识别上述3类样品近红外光谱信息的整体差异性。利用方差光谱、变量重要性投影(VIP)特征光谱及全光谱分别建立了不同比例梗丝样品的线性非负性回归模型,并对预测模型的准确性和稳定性进行评价。结果:① OPLS-DA 模式识别分析表明,3类样品的近红外光谱整体信息存在较大差异性。② 基于VIP值大于1,筛选出光谱波数范围为:4 000~4 165, 4 582~4 609, 4 612~5 264 cm^{-1} 。方差较大的波长范围:4 000~6 100, 6 900~7 500 cm^{-1} 。③ 方差光谱筛选波长变量建立的预测模型准确性和稳定性均优于VIP算法和全波长变量。结论:近红外光谱结合线性非负回归系数回归法快速测定成品烟丝中梗丝含量的方法具有较好的稳定性和准确性。

关键词:梗丝;掺配;近红外;线性非负回归系数回归

Abstract: Objective: To establish a rapid method for the determination of stem content in finished tobacco by near infrared spectroscopy. **Methods:** The finished tobacco mixed with different proportion of stem silk (5%, 8%, 11% and 14%) was used as the test object. The near infrared spectrum information of pure

stem silk, pure leaf silk and tobacco mixed with different proportion of stem silk was collected, respectively. Orthogonal Partial Least Squares Discrimination Analysis (OPLS-DA) was used to identify the overall difference of the near infrared spectral information of the above three kinds of samples. Variable Importance for the Projection (VIP) feature spectrum and full spectrum were used to establish linear non-negative regression models for stem silk samples of different proportions, respectively, and the accuracy and stability of the prediction models were evaluated.

Results: ① The OPLS-DA pattern recognition analysis showed that there was a great difference in the overall NIR information of the three kinds of samples. ② Based on the VIP value greater than 1, the spectral wave number range was 4 000~4 165, 4 582~4 609 and 4 612~5 264 cm^{-1} . Wavelength range with large variance: 4 000~6 100 and 6 900~7 500 cm^{-1} . ③ The accuracy and stability of the prediction model established by the variance spectrum screening wavelength variable were superior to VIP algorithm and superior to the full wavelength variable. **Conclusion:** The method of NIR combined with linear non-negative regression coefficient regression for the rapid determination of the content of stem in finished tobacco has good stability and accuracy.

Keywords: cut stem; blending; near infrared spectrum (NIR); non-negative coefficient regression

基金项目:红云红河烟草(集团)有限责任公司科技项目(编号:HYHH2019GY06)

作者简介:刘静,女,云南同创检测技术股份有限公司高级工程师,硕士。

通信作者:杨盼盼(1986—),男,云南同创检测技术股份有限公司高级工程师,博士。E-mail: 290927746@qq.com

收稿日期:2021-04-06

梗丝由烟梗经不同制丝工艺生产而成,属卷烟配方中“三丝”中的一种^[1],是成品烟丝重要的构成部分^[2]。梗丝在成品烟丝中含量及掺配均匀性直接影响卷烟的抽吸品质^[3]和产品质量^[4-5]。目前,成品烟丝中梗丝掺配比例的检测多依靠人工挑选后称重^[6],操作复杂,检测周期长。也有文献报道采用热重分析^[7]和色差法^[8]测定梗

丝含量,热重分析由于单次检测样品量较小,同一批样品多次平行测定结果波动较大,且受到测定仪器的影响,无法快速应用批量样品测定。随着制梗丝工艺的优化,成品梗丝与烟丝在色泽上较为接近,因此色差法有一定的误差。

近红外光谱分析技术已被广泛地应用于烟叶及卷烟产品质量的定性及定量分析^[9-11]。胡立中等^[1]曾采用近红外光谱结合偏最小二乘回归建模测定配方烟丝中梗丝含量,但需取制大样本量的建模样品以提高方法的稳定性和准确性,在卷烟生产过程中实际应用存在一定的局限性。

方开泰等^[12]提出的回归系数线性非负线性回归计算方法是一种配方回归算法,其最初应用于混凝土配方中各原料含量的计算。近红外光谱非负线性回归较其结合偏最小二乘回归的优点在于无需取制大样本量的代表性样品。李雪莹等^[13]采用近红外导数光谱结合线性非负回归系数法(配方回归)预测不同部位混合片状烟叶组成比例,结果显示模型预测误差小于10%,说明该方法用于解析不同性质烟草样品比例是可行的。但截止目前,尚未见采用近红外光谱结合非负线性回归测定梗丝掺配比例的文献报道。

试验拟基于某牌号卷烟的梗丝、叶丝及掺配不同比例梗丝的成品烟丝的近红外光谱结合波长筛选,采用线性非负回归系数回归模型测定成品烟丝中梗丝掺配比例,以期为梗丝有效利用率及其掺配均匀性评价提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

某牌号卷烟的叶丝和梗丝:云南中烟工业有限责任公司;

傅里叶变换近红外光谱仪:Nicolet Antaris II型,美国 Thermo Fisher 公司;

电子天平:AE200型,瑞士 Mettler Toledo 公司;

样品旋风磨:CT410型,丹麦 Foss 公司。

1.2 方法

1.2.1 样品预处理及近红外光谱采集 按照5%,8%,11%,14%的梗丝比例分别称取梗丝和叶丝,配制成具有不同梗丝含量的烟丝样品各30个,每个样品的总重量为50g。取纯梗丝样品50个,叶丝样品30个。参照标准[14]中所述方法对样品进行预处理和近红外光谱的采集。每个样品平行采集3条近红外光谱,取3条光谱的平均光谱作为样品光谱。

1.2.2 光谱预处理 为消除烟草粉末样品颗粒度大小不均匀产生的近红外散射,采用多元散射校正

(Multiplicative Scatter Correction, MSC)对光谱进行预处理。采用 Karl Norris 滤波和二阶求导处理过滤近红外光谱信息中的噪声和基线漂移。上述光谱预处理过程采用 TQ Analyst 软件完成。

1.2.3 不同类型样品近红外光谱模式识别和波长筛选

为筛选3种类型样品(纯梗丝、成品烟丝和叶丝)近红外光谱中的差异性信息,采用正交偏最小二乘判别分析^[15-16](OPLS-DA)建立上述3种类型样品的模式识别模型,并采用模型内部参数光谱变量累计解释能力 $R^2X_{(cum)}$,分类变量累计解释能力 $R^2Y_{(cum)}$,累计交叉有效性 $Q^2_{(cum)}$ 评价模型准确性,为进一步验证 OPLS-DA 模型的可靠性,将模型分类变量 Y 随机排列200次进行样本顺序随机置换,以计算出的 R^2 (决定系数)和 Q^2 回归线斜率大于1,且 Q^2 回归线的截距值小于0作为衡量模型不过拟合的标准。基于上述 OPLS-DA 模型变量投影重要性指标(Variable Importance in Projection, VIP)值大于1^[17]和方差光谱^[18]筛选3种类型样品近红外光谱差异性信息。上述过程采用 SIMCA 14.1 软件完成。

1.2.4 线性非负回归系数回归模型的建立及评价 基于线性非负回归系数回归算法,分别利用全波长、VIP值和方差光谱筛选的特征波长建立梗丝含量的预测模型。采用模型预测值与实际值的相对误差和 t 检验结果评价模型的准确性;采用模型预测值的标准偏差评价其稳定性。

线性非负回归系数回归模型的计算公式:

$$Y = X\beta + \varepsilon, \quad (1)$$

$$I'_p\beta = 1, \quad (2)$$

式中:

Y ——成品烟丝样品近红外光谱数据构成的 $n \times 1$ 向量(n 为近红外光谱点数);

X ——纯梗丝及叶丝样品近红外光谱数据构成的 $n \times 2$ 矩阵;

β —— 2×1 的系数矩阵, $\beta \geq 0$;

ε —— $n \times 1$ 向量;

I'_p ——元素全为1的矩阵。

式(1)为模型计算式,式(2)为条件约束式。在约束式(2)之下用最小二乘估计求解 β ,使 $Q = (Y - X\beta)(Y - X\beta) \rightarrow \min$ 得到 β^* 值,利用矩阵的消去变换,解得 β^* 。按照配方回归算法模型解得的配比向量 β^* ,即为成品烟丝样品中纯梗丝样品及叶丝样品的组成比例。

2 结果与讨论

2.1 不同类型样品近红外光谱模式识别

纯梗丝、纯叶丝及掺配不同比例梗丝烟丝样品的原始近红外光谱如图1所示。由图1可知,纯梗丝与其他两类样品的近红外光谱均存在明显差异。

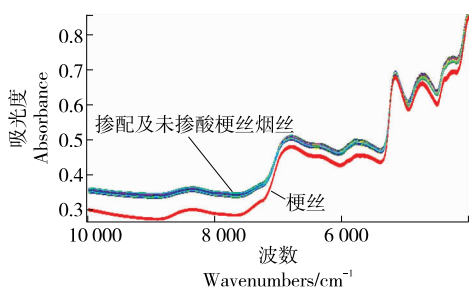


图 1 样品原始近红外光谱

Figure 1 Original NIR spectra of the sample

为进一步明晰 3 种类型样品(叶丝、纯梗丝和掺配不同比例梗丝的烟丝)在近红外光谱整体信息上的差异,采用 OPLS-DA 算法对光谱预处理后 3 种类型样品近红外光谱进行模式识别,模型分类效果如图 2 所示。前 2 个主成分数下模型的 $R^2 X_{(cum)} = 0.982$ 、 $R^2 Y_{(cum)} = 0.966$ 、 $Q^2_{(cum)} = 0.827$,表明模型的稳定性和交叉验证的预测能力都较高。OPLS-DA 模型 200 次置换验证图如图 3 所示,由图 3 可知, R^2 和 Q^2 回归线的斜率均大于 1,且 Q^2 回归线的截距小于 0,表明建立的模型结果可靠,未出现过拟合现象。

2.2 特征波长的筛选

OPLS-DA 模型中 VIP 值可反映 X 变量(光谱吸光度)对解释变量 Y(分类变量)的贡献率。其值越大则对分类贡献越大。建立的 OPLS-DA 模型中不同波数点的 VIP 值如图 4 所示。为有效排除近红外光谱波长变量中与分类无关的信息变量对建立的线性非负回归系数回归模型稳定性和准确性的干扰,筛选 VIP 值大于 1 的波长变量进行回归分析。筛选出 VIP 值大于 1 的光谱波数范围为 4 000~4 165, 4 582~4 609, 4 612~5 264 cm^{-1} 。

方差光谱可在一定程度上反映光谱的差异性。对 3 种类型样品(叶丝、纯梗丝和掺配不同比例梗丝的烟丝)分别计算其平均光谱,后计算 3 类样品平均光谱的方差光谱,求得的方差光谱如图 5 所示。由图 5 可知,方差光谱中方差值较大的波长为 4 000~6 100, 6 900~7 500 cm^{-1} 。

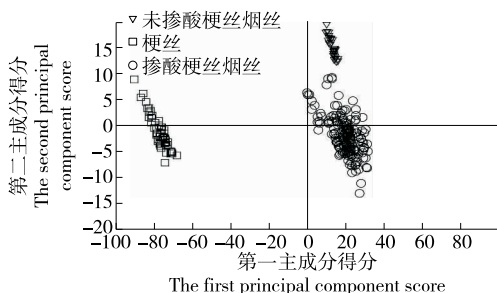


图 2 3 种类型样品近红外光谱 OPLS-DA 分类效果

Figure 2 OPLS-DA classification effect of NIR model of three types samples

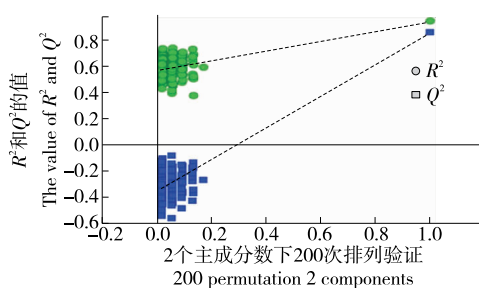


图 3 OPLS-DA 模型置换验证图

Figure 3 Diagram of OPLS-DA model replacement verification

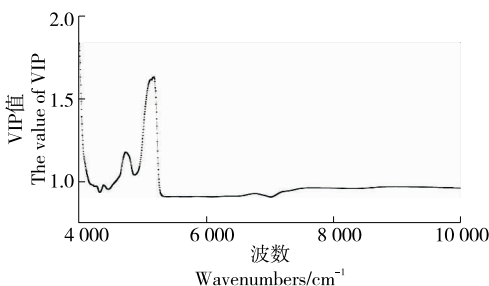


图 4 OPLS-DA 分类模型中不同波数点 VIP 值

Figure 4 VIP values of different wave points in the OPLS-DA classification model

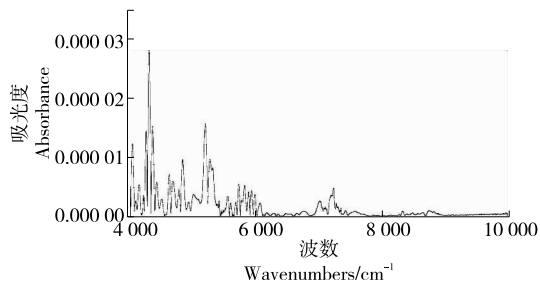


图 5 3 种类型样本的方差光谱

Figure 5 Variance spectra of three types samples

2.3 线性非负回归系数回归模型的建立及评价

分别采用全波长变量、VIP 和方差光谱筛选出的波长变量建立不同梗丝含量的烟丝样品近红外光谱线性非负线性回归模型。模型预测出的梗丝含量描述性统计分析结果如表 1 所示。由表 1 可知,从模型预测结果的准确性判定,方差光谱法优于 VIP 算法和全波长变量。在模型预测结果的稳定性方面,方差光谱法优于 VIP 算法和全波长变量。由预测值与实际值的 t 检验结果可知除 VIP 筛选波长变量建立的梗丝含量 8% 的预测模型外,3 种光谱筛选算法建立的模型的预测值与实际值在 $\alpha = 0.05$ 显著水平下均无显著差异。由以上结果可知,方差光谱筛选的波长变量建立的预测模型的准确性和稳定性上均优于 VIP 算法和全波长变量。

表 1 不同光谱变量筛选方法建立模型的预测结果

Table 1 Prediction results of models established by different spectral variable screening methods

光谱变量 筛选方法	实际梗丝质 量百分比/%	模型预测梗丝质量百分比					
		平均值/%	差值/%	相对误差/%	标准偏差	t 值	P 值
VIP	5	4.73	0.27	5.40	0.017 9	-0.816	0.421
	8	6.61	1.39	17.38	0.030 6	-2.489	0.019
	11	11.54	0.54	4.91	0.037 8	0.790	0.436
	14	13.15	0.85	6.07	0.045 1	-1.028	0.312
方差光谱	5	4.95	0.05	1.00	0.020 4	-0.122	0.904
	8	8.29	0.29	3.63	0.024 4	0.657	0.516
	11	10.57	0.43	3.91	0.030 1	-0.791	0.435
	14	14.41	0.41	2.93	0.028 3	0.791	0.435
全波长	5	5.32	0.32	6.40	0.020 1	0.866	0.393
	8	7.94	0.06	0.75	0.038 9	-0.085	0.933
	11	10.15	0.85	7.73	0.045 1	-1.028	0.312
	14	13.06	0.94	6.71	0.059 5	-0.862	0.396

3 结论

正交偏最小二乘判别分析可对纯梗丝、纯叶丝和掺配不同比例梗丝的烟丝样品的近红外光谱信息整体差异性进行有效识别。基于模型变量投影重要性指标值大于 1 原则和方差光谱法分别筛选出 3 类样品差异性较大的近红外光谱波数范围。方差光谱筛选的波长变量建立的预测模型的准确性和稳定性均优于变量投影重要性参数法和全波长变量。针对 5%, 8%, 11%, 14% 的梗丝掺配比例, 采用方差光谱筛选近红外波长变量建立的线性非负回归模型对梗丝掺配比例的预测值与实际值相对误差分别为 1.00%, 3.63%, 3.91%, 2.93%, 均小于 5%, 且独立样本 t 检验结果表明预测值和实际值不存在显著差异 (P > 0.05), 说明该方法满足定量分析的要求。近红外光谱结合线性非负回归系数回归法快速测定成品烟丝中梗丝含量的方法具有较好的准确性。

参考文献

[1] 胡立中, 张胜军, 余小平, 等. 均匀设计-PLS-NIR 法预测卷烟配方烟丝中梗丝及薄片丝含量[J]. 中国烟草学报, 2010, 16(2): 26-30.
 HU Li-zhong, ZHANG Sheng-jun, YU Xiao-ping, et al. Estimation of cut stem and reconstituted tobacco content in different cigarette blends by uniform design-PLS-NIR[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2010, 16(2): 26-30.

[2] 刘晓萍, 李斌, 于川芳, 等. 基于近红外光谱的卷烟配方结构识别[J]. 烟草科技, 2006(10): 16-18, 27.
 LIU Xiao-ping, LI Bin, YU Chuan-fang, et al. Recognition of cigarette blend make-up based on NIR spectrum[J]. Tobacco Science &

Technology, 2006(10): 16-18, 27.

[3] 范红梅, 喻赛波, 谭海风, 等. 不同梗丝微观结构和燃烧特性差异及其对卷烟的影响[J]. 烟草科技, 2018, 51(8): 53-60.
 FAN Hong-mei, YU Sai-bo, TAN Hai-feng, et al. Microstructure and combustion characteristics of cut and shredded stems and their influences on cigarette[J]. Tobacco Science and Technology, 2018, 51(8): 53-60.

[4] 丁美宙, 刘欢, 刘强, 等. 梗丝形态对细支卷烟加工及综合质量的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 197-202.
 DING Mei-zhou, LIU Huan, LIU Qiang, et al. Effects of stem morphology on processing and comprehensive quality of slim cigarettes[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 197-202.

[5] 金哲, 朴永革, 黄树永, 等. 3 种梗丝不同掺配比例对卷烟质量的影响[J]. 烟草科技, 2012(12): 5-8, 21.
 JIN Zhe, PIAO Yong-ge, HUANG Shu-yong, et al. Effects of blending proportions of three kinds of cut stems on cigarette quality[J]. Tobacco Science & Technology, 2012(12): 5-8, 21.

[6] 李晓, 纪晓楠, 姚二民, 等. 烟用梗丝加工工艺研究进展[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(8): 182-186.
 LI Xiao, JI Xiao-nan, YAO Er-min, et al. Research progress of cut tobacco stem processing technology[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(8): 182-186.

[7] 李斌, 蔡佳校, 何邦华, 等. 一种基于热分析技术测定烟丝中梗丝含量的方法: CN107271312B[P]. 2019-06-21.
 LI Bin, CAI Jia-xiao, HE Bang-hua, et al. A method for determination of stem content in cut tobacco based on thermal analysis technology: CN107271312B[P]. 2019-06-21.

[8] 祁林, 唐习书, 王仕宏, 等. 利用色差法测定配方烟丝中的梗丝含量[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(6): 1 023-1 028.

- QI Lin, TANG Xi-shu, WANG Shi-hong, et al. Determination of cut stem content in cut filler by chromatic aberration method[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2020, 35(6): 1 023-1 028.
- [9] 赵科文, 陈实, 蒋浩, 等. 基于近红外光谱技术的烟丝掺配均匀度测定[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 183-188.
- ZHAO Ke-wen, CHEN Shi, JIANG Hao, et al. Determination of blending uniformity of cut tobacco based on near infrared spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2020, 36(11): 183-188.
- [10] 徐安传, 胡巍耀, 王超, 等. 应用近红外技术直接检测烟丝常规化学成分的研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(4): 393-398.
- XU An-zhuan, HU Wei-yao, WANG Chao, et al. Study on direct prediction of chemical components of tobacco cut by NIRS[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(4): 393-398.
- [11] 李瑞丽, 刘玉叶, 李文伟, 等. 利用近红外光谱技术快速检测配方烟丝掺配均匀性[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 83-87.
- LI Rui-li, LIU Yu-ye, LI Wen-wei, et al. Study on rapid determination of tobacco blending uniformity by near infrared spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 83-87.
- [12] 方开泰, 贺曙东. 含有线性约束及线性非负回归系数的回归模型[J]. 计算数学, 1985, 7(3): 237-246.
- FANG Kai-tai, HE Shu-dong. A regression model with linear constraints and linear non-negative regression coefficients[J]. Mathematica Numerica Sinica, 1985, 7(3): 237-246.
- [13] 李雪莹, 束茹欣, 栾丽丽, 等. 近红外光谱结合线性非负回归系数回归法(配方回归)解析混合样品的组成比例[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4): 63-67.
- LI Xue-ying, SHU Ru-xin, LUAN Li-li, et al. Study on the analysis of the proportion of mixed samples with near infrared spectroscopy and non-negative coefficients regression[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(4): 63-67.
- [14] 云南省质量技术监督局. 烟草及烟草制品 主要化学成分指标的测定 近红外漫反射光谱法: DB53/T 497—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 3-4.
- Yunnan Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. Determination of major chemical components of tobacco and tobacco products by near-infrared diffuse reflectance spectrometry: DB53/T 497—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015: 3-4.
- [15] 邝格灵, 李树, 宁甜甜, 等. 基于 GC-MS 指纹图谱和多元统计学区分四川保宁醋和山西老陈醋的挥发性差异代谢产物[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 227-232.
- KUANG Ge-ling, LI Shu, NING Tian-tian, et al. Differential volatile metabolites between sichuan baoning vinegar and Shanxi aged vinegar determined by GC-MS fingerprint and multivariate statistics[J]. Food Science, 2020, 41(16): 227-232.
- [16] 王俊, 许多宽, 肖勇, 等. 基于化学指标的烟叶产区正交偏最小二乘判别分析[J]. 中国烟草科学, 2017(1): 91-96.
- WANG Jun, XU Duo-kuan, XIAO Yong, et al. The OPLS-DA model of tobacco producing areas based on chemical measurements[J]. Chinese Tobacco Science, 2017(1): 91-96.
- [17] 刘旭, 王耀峰, 余广宏, 等. 高温介导 N 基因对 TMV 免疫丧失的代谢轮廓分析[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(2): 84-92.
- LIU Xu, WANG Yao-feng, YU Guang-hong, et al. Metabolic profiling analysis of immune deficiency of TMV by high temperature mediated gene N[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2016, 22(2): 84-92.
- [18] 颜鸿飞, 彭争光, 李蓉娟, 等. GC-TOF MS 结合化学计量学用于安化黑茶的识别[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 34-37, 65.
- YAN Hong-fei, PENG Zheng-guang, LI Rong-juan, et al. Discrimination of Anhua dark tea by gas chromatography-time of flight mass spectrometry combined with chemometrics[J]. Food & Machinery, 2017, 33(8): 34-37, 65.
-
- (上接第 80 页)
- [11] 郭树国, 张召, 王丽艳, 等. 基于 CFX 的豆粕单螺杆挤出机的三维流场分析[J]. 大豆科学, 2015, 34(4): 699-702.
- GUO Shu-guo, ZHANG Zhao, WANG Li-yan, et al. Three-dimensional flow field analysis of soybean meal single screw extruder based on CFX[J]. Soybean Science, 2015, 34(4): 699-702.
- [12] 郭树国, 张召, 王丽艳. 基于 ANSYS 的豆粕双螺杆膨化机的三维流场分析[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 213-216, 240.
- GUO Shu-guo, ZHANG Zhao, WANG Li-yan. Three-dimensional flow field analysis of soybean meal double-seed extruder based on ANSYS[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery Chemistry, 2014, 35(6): 213-216, 240.
- [13] 汤霖森, 郭树国, 王丽艳. 基于 ANSYS 的带行星轮同轴变速单螺杆挤出机三维流场分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 107-110.
- TANG Lin-sen, GUO Shu-guo, WANG Li-yan. Three-dimensional flow field analysis of coaxial variable speed single screw extruder with planetary gears based on ANSYS[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 107-110.
- [14] 王少峰, 张媛, 刘美莲, 等. 不同温度状态下啮合异向双螺杆挤出机的流道分布规律[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 71-74.
- WANG Shao-feng, ZHANG Yuan, LIU Mei-lian, et al. Flow channel distribution of intermeshing counter-rotating twin-screw extruder under different temperature conditions[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 71-74.
- [15] 章梓雄, 董曾南. 黏性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 749-751.
- ZHANG Zi-xiong, DONG Zeng-nan. Viscous fluid mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 749-751.
- [16] 唐庆菊, 李纪强, 周平. 基于 ANSYS 的食品双螺杆挤出机流场数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2007(12): 94-95.
- TANG Qing-ju, LI Ji-qiang, ZHOU Ping. Numerical simulation of flow field of food twin-screw extruder based on ANSYS[J]. Machine Design and Manufacturing, 2007(12): 94-95.