

基于多波段漫反射光谱古陶瓷窑口无损鉴定

李 净¹, 管业鹏^{1, 2*}, 李伟东³, 罗宏杰⁴

1. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444
2. 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072
3. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201899
4. 上海大学文化遗产保护基础科学研究院, 上海 200444

摘 要 古陶瓷是历史的遗存, 具有不可再生性, 因而理想的古陶瓷分析技术应该是无损的。为客观、有效地对古陶瓷窑口进行无损鉴定, 提出了一种基于紫外、可见光和近红外的多波段漫反射光谱无损鉴定方法。针对传统单一波段古陶瓷窑口鉴定对目标特征描述不足的问题, 即在可见光波段区域, 漫反射光谱数据可反映古陶瓷的颜色特征, 但在同一窑口烧制的陶瓷也会有不同的颜色属性, 仅仅根据可见光波段的漫反射反射率来鉴定窑口来源是不合理的, 在紫外与近红外波段, 古陶瓷内部分子与此波段光发生作用后的漫反射光谱数据, 可反映古陶瓷携带的丰富样品结构和物质属性信息, 结合紫外与近红外光谱漫反射光谱数据可有效提高特征的表达, 因此提出利用紫外、可见光和近红外的多波段特征提取方法。在实验过程中, 基于多波段线性特征融合窑口平均鉴定准确率为 92.9%, 相比于单波段的窑口鉴定平均准确率 91.1% 提高了 1.8%, 实验结果验证了所提多波段方法相对单波段方法的有效性; 在特征提取过程中, 常用小波变换对光谱信号进行处理, 但由于古陶瓷漫反射光谱波信号在紫外、可见光与近红外波段形波动大, 频率变化大, 因此, 在小波基的选取上存在很大困难, 提出利用自适应时频分析特征提取方法, 其特点是可自适应分配不同频率子波本征模态函数, 通过选择合适的本征模态函数来提取古陶瓷不同波段的光谱特征, 但在分解过程中存在过分解现象, 即虚假的本征模态函数, 将所有样本与分解的本征模态函数的平均相关系数和平均方差贡献率作为选择本征模态函数的标准, 实验结果表明, 随着分解阶次的递增平均相关系数和平均方差贡献率递减, 当分解阶次为 4 时, 相关系数和方差贡献率都为 0.30, 但当分解阶次为 5 时, 相关系数和方差贡献率仅为 0.15 和 0.18, 因此选择 4 阶分解, 用于不同波段的特征提取; 所提取的特征给与分类器进行分类时, 不同波段的特征对分类的准确率贡献不同, 因此在此基础上, 计算不同光谱特征的散布矩阵, 利用类内与类间散布矩阵的迹, 计算特征融合时不同波段特征的权重, 自适应分配权重并进行非线性特征融合, 权重越大, 表明该类特征对鉴别的贡献越大, 非线性特征融合时, 平均鉴定准确率为 94.5%, 相比于线性特征融合鉴定平均准确率 92.9% 提高了 1.6%; 其中分类器采用 k 最近邻分类器对来自不同窑口的古陶瓷进行无损分类识别。通过客观定量地将该方法与同类方法进行对比, 朱旭峰等利用非线性特征融合方法, 窑口平均鉴定准确率为 86.97%, 该方法比其高 7.53%。刘峰等采用基于协方差阵进行特征级融合多波段方法, 窑口平均鉴定准确率为 89.63%, 该方法比其高 4.87%。实验结果表明所提方法有效、可行, 可作为古陶瓷窑口鉴定的有效辅助鉴定方法。

关键词 古陶瓷; 科技鉴定; 多波段; 经验模态分解; 特征融合

中图分类号: TP391.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)01-0166-06

收稿日期: 2017-12-20, 修订日期: 2018-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51232008, 51672302)资助

作者简介: 李 净, 女, 1992 年生, 上海大学通信与信息工程学院硕士研究生 e-mail: alpha_lee@163.com

* 通讯联系人 e-mail: ypguan@shu.edu.cn

引 言

中国陶瓷历史悠久、工艺精湛、科技内容丰富、艺术表现多彩，久为世人推崇和公认。近 3 000 多年，它经历了形成到高峰的发展，它的科学技术内涵非常丰富，艺术表现丰富多彩，共同形成了我国瓷釉百花争艳、流传千古并独步天下的局面。

古陶瓷的断源、断代一直是古陶瓷研究工作的一个重要组成部分。除了目测，从古陶瓷的器型、纹饰等艺术考古的角度确定不同时代、窑口产品的差异外，目前现代自然科学技术应用于古陶瓷的鉴别主要有两种形式，分别有成分判别法^[1]和热释光技术^[2]。成分分辨法根据不同窑口古陶瓷的胎、釉的材料不同，通过分析古陶瓷元素的不同来对古陶瓷的窑口进行鉴定，但是对于除官窑和部分民窑外，不同窑口胎和釉均会存在明显差异^[3]，因此，其对标准件的取样会存在很大困难。热释光技术不需要大量的标准器件对比，是一种绝对断代方法，它根据陶瓷加热后的“热释光”现象，热释光的强度与时间成正比，通过测量积累的热释光辐射能计算器件的烧制时间，从而达到断源的目的。但是它是一种有损鉴定，对珍贵的古陶瓷将造成很大的损失。

古陶瓷是历史的遗存，具有不可再生性，因而理想的古陶瓷分析技术应该是无损的，而漫反射光谱技术正具备了这一特点，无需从古陶瓷上取样，且设备简单，从而避免对古陶瓷所产生破坏。其中，文献^[4]利用近红外波段进行检测与鉴定，但由于紫外以及可见光波段也有反映古陶瓷属性的丰富信息^[5]，因此，仅利用近红外波段进行古陶瓷检测与鉴定，存在一定的局限性。其中，在可见光波段区域，漫反射光谱数据可反映古陶瓷的颜色特征^[6]，在紫外与近红外波段，古陶瓷内部分子与此波段光发生作用后的漫反射光谱数据，则可反映古陶瓷携带的丰富样品结构和物质属性信息^[7]。文献^[8]利用小波变换对光谱信号进行处理，但由于在漫反射光谱数据采集过程中，古陶瓷漫反射光谱波信号在紫外、可见光与近红外波段波形不仅波动大，而且频率变化大，因此，在小波基的选取上存在很大困难；文献^[9]利用多波段对物质进行分析，虽然进行了多特征线性联合，但由于没有区分多个波段特征的贡献率，因此，进行物体类别区分时，其识别性能不理想；刘峰等^[10]基于协方差阵进行特征级融合多波段方法，将不同特征直接转换成协方差阵作为样本进行训练，虽然该方法降低了计算复杂度，但是损失了原特征的信息量，因此，采用该方法进行识别，其性能也不理想。

本文通过紫外、可见光以及近红外波段同时进行古陶瓷窑口的鉴定，充分利用不同波段对物质漫反射表现出的不同属性的性质，提高古陶瓷鉴定的准确性。本研究主要特色与贡献体现在如下方面：(1)根据古陶瓷漫反射光谱信号表现出的非线性、非平稳性质，基于经验模态分解^[11]方法，通过自适应时频分析特征提取，获取古陶瓷不同波段的光谱特征；(2)根据不同波段漫反射反映古陶瓷不同特质属性，通过计算不同光谱特征的类间散布矩阵和类内散布矩阵，自适应分配相应的光谱特征向量权重；(3)通过对上述不同波段的

漫反射光谱特征进行非线性特征融合，获取反映古陶瓷的有效本质特征，采用 k 最近邻分类器对来自不同窑口的古陶瓷进行无损分类识别。通过与同类古陶瓷窑口鉴定分析方法的客观定量对比，实验结果表明本文所提方法有效、可行。

1 实验部分

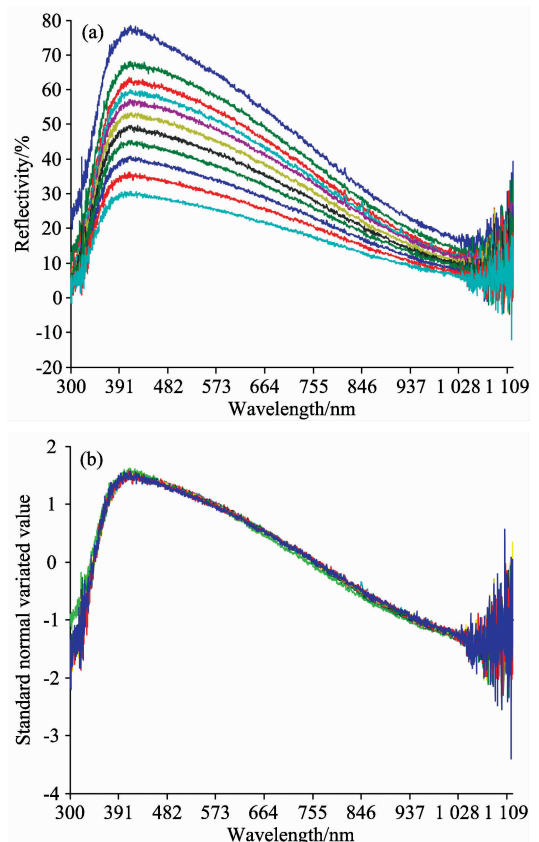
1.1 样本数据预处理

紫外、可见光、近红外漫反射光谱往往受到高频基线漂移、随机噪声等因素的影响，样本光谱扫描后，需要对样本进行预处理，因为标准正态变换预处理方法能够有效消除基线漂移、固体颗粒大小、表面散射以及光程变化对漫反射光谱造成的影响，且 Savitzky-Golay 平滑^[12]（窗口参数 12，拟合次数 2）可有效平滑曲线，消除随机噪声的影响。本文采用标准正态变换预处理方法以及 Savitzky-Golay 平滑方法进行光谱数据预处理。

耀州窑原始光谱如图 1(a)所示，样本的原始光谱图存在明显的基线漂移，经标准正态变换预处理后，基线漂移得到了消除，光谱如图 1(b)所示；再进行 Savitzky-Golay 平滑处理后，大部分毛刺和随机噪声则得到了压制，光谱如图 1(c)所示。

1.2 古陶瓷多波段漫反射光谱数据特征提取

由图 1(c)大体可见，光谱范围在 378~1 014 nm 的段范围内，预处理后的光谱特征较平稳，而 300~378 nm 光谱波长的紫外光波段以及 1 014~1 108 nm 波长的近红外光波段，漫反射光谱抖动明显，存在较强的非平稳特性。由图 1



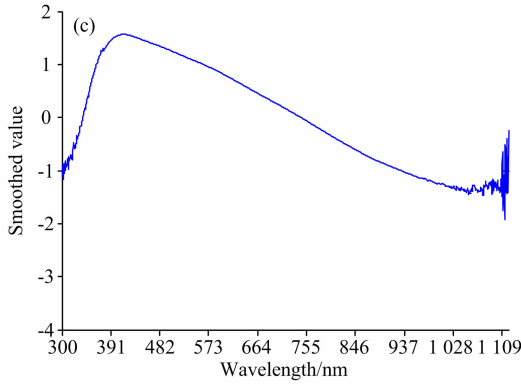


图 1 (a) 耀州窑原始光谱图; (b) 耀州窑 SNV 预处理后光谱图; (c) 耀州窑高斯滤波预处理前后光谱图

Fig. 1 (a) Yaozhou kiln original spectrogram; (b) Yaozhou kiln SNV pretreatment spectrum; (c) Yaozhou kiln gauss filter pretreatment spectroscopy

可知: 三个不同波段(紫外、可见光和近红外)的漫反射光谱特征存在明显差异。

为有效提取反映古陶瓷光谱特征, 提出了一种自适应时频分析特征提取方法, 从而将非线性、非平稳光谱特征自适应地分解成有限个本征模态分量, 以扩大基于光谱特征进行古陶瓷无损识别、鉴定的特征信息。

自适应时频分析特征提取方法采用三次样条插值的方式, 自适应地将光谱特征信号分解出多个具有物理意义的本征模态分量^[11]。具体求解过程为, 先求解漫反射光谱预处理后信号 $x(t)$ 所有局部极大值极小值点, 采用三次样条插值法确定上下包络线, 得到两条包络线的平均值 $m(t)$, 在待分解的原紫外、近红外漫反射光谱信号中剔除包络线的平均值 $m(t)$, 得到剩余分量 $i(t)$

$$i(t) = x(t) - m(t) \quad (1)$$

若 $i(t)$ 满足本征模态函数条件^[11], 则 $i(t)$ 表示为第一阶本征模态函数, 否则将 $i(t)$ 作为新的 $x(t)$, 求解新的包络线的平均值 $m(t)$ 和新的剩余分量 $i(t)$, 直到剩余分量 $i(t)$ 满足本征模态函数条件为止; 此时的剩余分量 $i(t)$ 即为第一阶本征模态函数 $i_1(t)$ 。求出剩余序列, 即原紫外、近红外漫反射光谱信号 $x(t)$ 与 $i_1(t)$ 的差

$$r_1(t) = x(t) - i_1(t) \quad (2)$$

将 $r_1(t)$ 作为新的原始信号, 重复以上过程, 直到经多次分解出多个本征模态函数, 且 $r_i(t)$ 成为单调函数, 或者很小不能再分解为止。故原信号可表示为多个本征模态函数与一个剩余分量之和

$$x(t) = \sum_{i=1}^N i_i(t) + r_N(t) \quad (3)$$

式中 $i_i(t)$ 为第 i 个本征模态函数, 分别表示紫外、近红外漫反射光谱信号由高到低不同频段分量; $r_N(t)$ 为剩余项。

自适应时频分析特征提取方法存在过分解现象^[13], 即虚假分量。一方面, 真实分量与原紫外、近红外漫反射光谱信号具有较大的相关性, 而虚假分量由误差形成, 相关性很小; 另一方面, 分量的方差贡献率可以衡量分量的重要性,

其值越大, 相应分量越重要。引入如下本征模态函数分量评价指标

$$co(i) = \frac{\sum_{j=1}^N [x(j) - \bar{x}][c_i(j) - \bar{c}_i]}{\sqrt{\sum_{j=1}^N [x(j) - \bar{x}]^2 \sum_{j=1}^N [c_i(j) - \bar{c}_i]^2}} \quad (4)$$

$(i = 1, 2, \dots, n)$

$$var(i) = \frac{\left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N c_i(j)^2 - \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N c_i(j) \right]^2 \right\}}{\sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N c_i(j)^2 - \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N c_i(j) \right]^2 \right\}} \quad (5)$$

其中, $co(i)$ 为各个本征模态函数与原始信号 $x(t)$ 的相关系数, $var(i)$ 为各个本征模态函数的方差贡献率; N 是原始信号采样数。

对古陶瓷漫反射光谱预处理后, 进行自适应时频分析特征提取方法分解时, 每一个信号分别得到 8 个本征模态函数分量 $IMF_1 - IMF_8$, 求解所有样本 $IMF_1 - IMF_8$ 分量与预处理后信号的平均相关系数和平均方差贡献率, 结果如图 2。

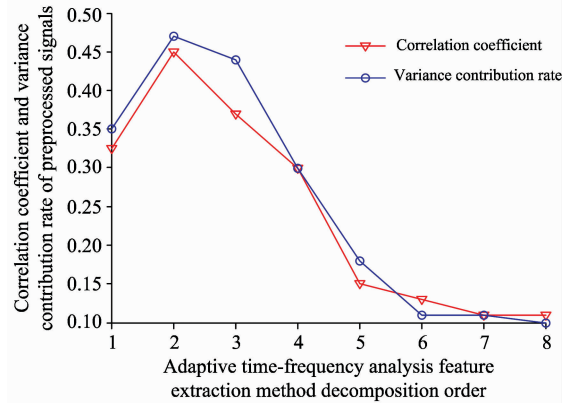


图 2 各本征模态函数与原预处理后信号相关性 & 方差贡献率平均值结果

Fig. 2 The results of the correlation and the variance contribution rate between the intrinsic mode function and the signal after the preconditioning

由图 2 可知, 本征模态函数与未分解原信号的相关系数和方差贡献率有很好的正相关性, 两个指标都是先增大后减小, 当分解的阶次较低时所对应的本征模态函数相关系数较大, 方差贡献率较高, 设相关系数和方差贡献率阈值都为 0.20 时, 当在阶次为 5 时, 相关系数和方差贡献率仅为 0.15 和 0.18。可以认为 $IMF_5 - IMF_8$ 为虚假分量, 可以剔除。即将 $IMF_1 - IMF_4$ 作为我们所需的特征重构向量最为合适。

1.3 多波段漫反射光谱特征非线性融合

设样本空间中有 α 类一共 N 个样本, 用 x_k 来表示, 每一类中有 N_i 个样本。则类内散布矩阵用 S_w 来表示为

$$S_w = \sum_i^{\alpha} \sum_{j_k \in N_i} (m_i - x_k)(m_i - x_k)^T \quad (6)$$

其中, m_i 表示 α 类样本中第 i 类样本的类内样本均值。

类间散布矩阵用 S_b 来表示为

$$S_b = \sum_{i=1}^{\alpha} N_i (m_i - m)(m_i - m)^T \quad (7)$$

其中, m 表示 α 类总体样本均值。

由式(7)可知, S_w 为类内样本的分散度, S_b 为该相对于总体的分散度。

利用 S_w 和 S_b 的迹, 计算特征融合时不同特征的权重

$$\omega_j = \frac{\text{tr}(S_w^{(j)} + S_b^{(j)})}{\text{tr}(S_w + S_b)}, j = 1, 2, 3 \quad (8)$$

其中, tr 表示计算矩阵的迹, $S_w^{(1)}$ 描述了目标的紫外波段漫反射光谱特征的类内散布矩阵, $S_w^{(2)}$ 描述了目标的可见光波段漫反射光谱特征的类内散布矩阵, $S_w^{(3)}$ 描述了目标的近红外波段漫反射光谱特征的类内散布矩阵; $S_b^{(j)}$ 分别表示每种特征的类型散布矩阵。

ω_j 越大, 则该类特征对鉴别的贡献越大。

进行基于上述贡献率融合后的特征向量为

$$I = \{\omega_1 I_1, \omega_2 I_2, \omega_3 I_3\} \quad (9)$$

2 结果与讨论

2.1 古陶瓷漫反射光谱数据采集

此次采集的样品包括四大类, 为北宋到南宋出自于十方堂一号和五号窑包的邛崃窑 92 件; 汝窑 44 件; 出自于唐朝、五代、宋代、金代以及元代的耀州窑 74 件; 出自于其他未知窑口古陶瓷样品以及现代烧制陶瓷样品 116 件。

对光谱数据的采集, 本文采用 IdeoOptics 公司, 型号 PG2000-Pro 的紫外-可见-近红外便携式光谱仪。

波长以固定波长间隔方式对四类窑口古陶瓷样本进行取样。在 300~1 108 nm 波段范围有效样本数据总数为 3 586 个, 其中邛崃窑 1 012 个、汝窑 484 个、耀州窑 814 个、其他类窑口及现代烧制陶瓷样品数据 1 276 个。300~378 nm 波段范围有效样本数据总数为 332 个; 378~1 014 nm 波段范围有效样本数据总数为 2 807 个; 1 014~1 108 nm 波段范围有效样本数据总数为 850 个。

2.2 方法对比与验证

基于 4 阶分解得到的本征模态函数重组进行特征提取, 利用可分配特征权重的 k 最近邻分类算法^[14-15]进行古陶瓷窑口二分类鉴别, 结果对比如图 3。

由图 3 结果所示为分别将三类已知窑口作为正样本, 其他类窑口以及现代陶瓷作为负样本, 所得三类窑口鉴别准确率的平均值。由此结果可知, 采用自适应时频分析特征提取方法进行古陶瓷窑口鉴别, 其准确率较未进行时频分析特征提取平均高出 2.8%。表明基于自适应时频分析特征提取方法, 有助于提升古陶瓷窑口鉴别性能, 也表明本文所提出的自适应时频分析特征提取方法有效、可行。

图 4 中, 组合编号为 4~7, 表明采用线性联合特征向量的古陶瓷窑口鉴别结果, 且每个波段的特征向量权重相同, 组合编号为 8~11, 则根据散布矩阵的迹所求得的权重确定非线性联合特征向量融合方式。

由图 4 的结果可知, 采用非线性三波段特征融合时, 窑口鉴别准确率平均值为 94.5%, 较采用线性三波段特征融合

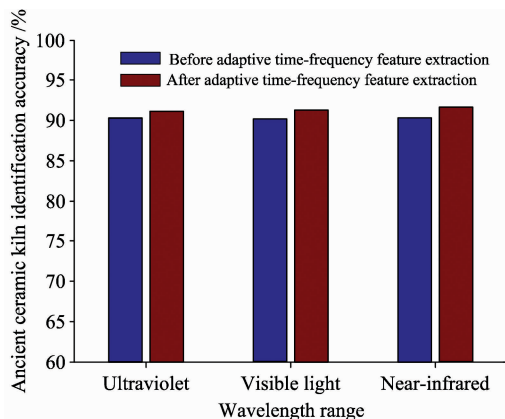


图 3 自适应时频分析特征提取方法分解前后古陶瓷窑口鉴别准确率

Fig. 3 Adaptive time-frequency analysis of feature extraction method before and after decomposition of ancient ceramics kiln identification accuracy

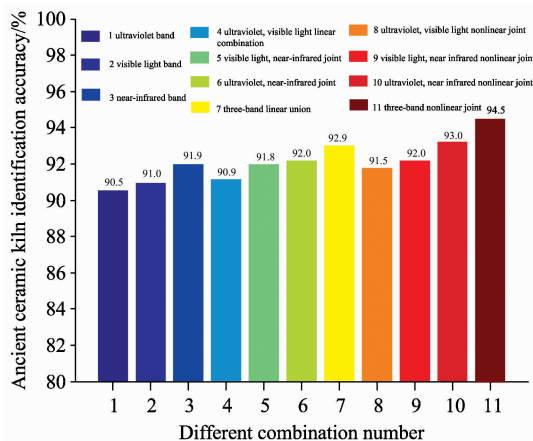


图 4 古陶瓷特征融合前后窑口鉴别准确率对比

Fig. 4 Comparison of the accuracy of identification of kilns before and after the featurefusion of ancient ceramics

的鉴别准确率高出 1.6%, 表明采用非线性特征融合方法进行古陶瓷窑口鉴别, 有助于提升古陶瓷窑口鉴别性能, 同时也表明本文所提出的非线性三波段特征融合方法有效、可行。

表 1 中为分别将三类已知窑口作为正样本, 其他类窑口以及现代陶瓷作为负样本, 分别所得三类窑口鉴别准确率, MWLU^[9]采用线性融合方法进行多波段联合, 在对古陶瓷窑口鉴定时, 其平均准确率为 86.97%, 而本文方法则根据不同特征对鉴别结果的贡献不同, 从而设置不同的权重对不同波段的特征进行非线性联合, 因此, 采用本方法进行古陶瓷窑口鉴定时, 平均准确率为 94.50%, 优于 MWLU7.53%; MRFF^[10]采用多波段基于协方差阵进行特征级融合, 它将不同特征直接转换成协方差阵作为样本进行训练, 该方法虽降低了计算复杂度, 但在一定程度上损失了原特征的信息量, 因此, 在对古陶瓷窑口鉴定时, 平均准确

率为 89.63%。而本文方法则利用内类与类间散布矩阵进行特征权重提取,在很大程度上保留了原特征的信息量,因此,采用本方法进行古陶瓷窑口鉴定时,优于 MRFF4.87%。

表 1 本方法与同类多波段方法的定量对比

Table 1 Quantitative comparison between this method and similar multi-band methods

对比方法	窑口类别	窑口鉴别准确率/%
MWLU ^[9]	邛崃窑	87.6
	汝窑	86.2
	耀州窑	87.1
MRFF ^[10]	邛崃窑	90.5
	汝窑	89.5
	耀州窑	88.9
本文方法	邛崃窑	93.6
	汝窑	94.3
	耀州窑	95.6

通过与上述同类古陶瓷窑口鉴定分析方法的客观定量对比,进一步表明本文方法有效、可行,可作为古陶瓷窑口鉴

定的有效辅助鉴定方法。

3 结 论

由于漫反射光谱在不同波段反射率反映的古陶瓷的不同性质,因此,结合多种特征提取,通过选用多波段鉴定方法,可充分利用不同波段对物质漫反射表现出的不同属性的性质,从而提高古陶瓷鉴定准确性;根据古陶瓷漫反射在三个波段反射率信号表现出非线性非平稳性质,采用自适应的时频分析特征提取方法对信号处理提取特征,可有效剔除无关虚假分量,从而提高鉴别准确率;根据不同的特征对古陶瓷窑口鉴定的贡献不同,通过提取不同特征的类间散布矩阵和类内散布矩阵,利用散布矩阵的迹的大小来求解不同特征所构成的特征向量权重进行非线性融合,有助于提高古陶瓷窑口鉴别性能,此方法可作为古陶瓷窑口鉴定的有效辅助鉴定方法。后续将建立古陶瓷在不同温度、不同施釉方法以及不同波段条件下的漫反射光谱数据库,基于深度学习进行进一步适用性方法的研究。

致谢:本研究得到“上海大学文化遗产保护科学研究院创新团队”的资助,最后致以由衷的感谢。

References

- [1] WU Jun, LI Jia-zhi, WU Rui(吴 隽, 李家治, 吴 瑞). International Symposium on Ancient Ceramics(古陶瓷科学技术国际讨论会), 2005. 502.
- [2] WANG Wei-da, XIA Jun-ding, ZHOU Zhi-xin(王维达, 夏君定, 周智新). SCIENCE IN CHINA Ser. E Technological Sciences(中国科学: 技术科学), 2006, 36(5): 525.
- [3] LI Wei-min(李卫民). China Cultural Heritage Scientific Research(中国文物科学研究), 2011, 5(1): 60.
- [4] Clairotte M, Grinand C, Kouakoua E, et al. Geoderma, 2016, 276: 41.
- [5] Wei H, Li H, Liu P, et al. Spectroscopy Letters, 2017, 48(9): 470.
- [6] Chakraborty S, Weindorf D C, Deb S, et al. Geoderma, 2017, 289: 72.
- [7] YANG Yi-min, FENG Min, MAO Zhen-wei(杨益民, 冯 敏, 毛振伟). Journal of Instrumental Analysis (分析测试学报), 2005, 24(6): 16.
- [8] Li X, Xie C, He Y, et al. Sensors, 2012, 12(7): 9847.
- [9] ZHU Xu-feng, MA Cai-wen, LIU Bo, et al(朱旭锋, 马彩文, 刘 波, 等). Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2011, (11): 1710.
- [10] LIU Feng, SHEN Tong-sheng, GUO Shao-jun, et al(刘 峰, 沈同圣, 郭少军, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(6): 1934.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903.
- [12] XIE Jun, PAN Tao, CHEN Jie-mei, et al(谢 军, 潘 涛, 陈洁梅, 等). Chinese Journal of Analytical Chemistry(分析化学), 2010, 38(3): 342.
- [13] SHANG Xue-yi, LI Xi-bing, PENG Kang, et al(尚雪义, 李夕兵, 彭 康, 等). Chinese Journal of Geotechnical Engineering(岩土工程学报), 2016, 38(10): 1849.
- [14] Peterson L. Scholarpedia, 2009, 4(2): 1883.
- [15] LÜ Feng, DU Ni, WEN Cheng-lin(吕 锋, 杜 妮, 文成林). Acta Electronica Sinica(电子学报), 2012, 40(12): 2390.

Ancient Ceramic Kiln Non-Destructive Identification Based on Multi-Wavelength Diffuse Reflectance Spectroscopy

LI Jing¹, GUAN Ye-peng^{1, 2*}, LI Wei-dong³, LUO Hong-jie⁴

1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

2. Key Laboratory of Advanced Display and System Application, Ministry of Education, Shanghai 200072, China

3. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China

4. Fundamental Science Institute of Cultural Heritage Conservation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract Ancient porcelain is a remnant of history and has non-regenerability, so the ideal ancient ceramic analysis technique should be nondestructive. In order to objectively and effectively identify ancient ceramics kiln, a non-destructive method has been developed based on ultraviolet, visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy to identify ancient ceramic kiln objectively and effectively. In view of the lack of description of the target characteristics in the traditional single-band ancient ceramic kilns, for example, the diffuse reflectance spectroscopy data can reflect the color characteristics of ancient ceramics in the visible region, but the ceramics fired in the same kiln will have different color property, only based on the diffuse reflectance of the visible light band to identify the source of the kiln unreasonable, in the ultraviolet and near-infrared and ultraviolet light band, the ancient ceramic interior molecules and the band light after the diffuse reflectance spectral data reflect the ancient rich sample structure and material properties carried by the ceramic can effectively improve the expression of the features by combining the UV and near-infrared spectral reflectance spectroscopy data. Therefore, we propose a multi-band feature extraction method using ultraviolet, visible and near infrared. During the actual experiment, the average identification accuracy based on multi-band linear feature fusion kiln is 92.9%, which is 1.8% higher than the average accuracy of 91.1% for single-band kiln identification. The experimental results verify that the multi-band method is effective; In the process of feature extraction, wavelet transform is often used to process the spectral signal. However, since the ancient ceramic reflection spectrum wave signal is in the ultraviolet region, the waveform of the diffuse reflection spectrum in the visible and near-infrared region is not only fluctuating but also changing greatly in frequency. Therefore, it is very difficult to select the wavelet basis. In this paper, The feature extraction method is characterized by adaptively distributing the intrinsic mode functions of different frequency wavelets, selecting the appropriate intrinsic mode functions to extract the spectral characteristics of different wavelength bands of the ancient ceramics, but there exists an over-decomposition phenomenon in the decomposition process, that is to say, the intrinsic mode function of the false component. The average correlation coefficient and the mean contribution rate of all the intrinsic mode functions of all the samples and the decomposition are taken as the criteria for selecting the intrinsic mode function. The experimental results show that with the decomposition order increases, the average correlation coefficient and the mean variance contribution rate decrease, and when the decomposition order is 4, the contribution rate of correlation coefficient and variance are 0.30, but when the decomposition order is 5, the contribution rate of correlation coefficient and variance is only 0.15 and 0.18. Therefore, the fourth-order decomposition is chosen for feature extraction in different bands. On this basis, calculate the distribution matrix of different spectral features, use intra-class and class scatter matrix traces, calculate the weight of different band features when the feature is fused, the greater the weight, indicating that the greater the contribution of such features to the identification; Finally, the k nearest neighbor classifier is used to classify the ancient ceramics from different kilns. By comparing objectively and quantitatively the proposed method with similar methods, Zhu Xufeng used non-linear feature fusion method, and the average identification accuracy of kiln is 86.97%, and the method of this paper is 7.53% higher than this method. Liu Feng used covariance matrix to solve the feature weight of multi-band method, and the average identification accuracy of kiln is 89.63%, and the method of this paper is 4.87% higher than this method. The experimental results show that the proposed method is effective and feasible. It can be used as an effective auxiliary appraisal method for ancient ceramic kiln identification.

Keywords Non-destructive identification; Multi-wavelength diffuse reflectance spectroscopy; Feature extraction and fusion; Self-adaptive time-frequency analysis

* Corresponding author

(Received Dec. 20, 2017; accepted Apr. 15, 2018)