

基于显微共焦拉曼光谱技术的桑蚕丝及其织物的鉴别与分析

熊佳琪¹ 李卫东¹ 努尔艾力·阿地力² 朱安宇¹

1. 东华大学 纺织学院(中国)

2. 棉花公检二室 阿克苏地区纤维检验所(中国)

摘要: 利用显微共焦拉曼光谱技术对桑、柞蚕丝的纤维及其织物进行鉴别,分析桑蚕丝织物的种类、颜色对拉曼光谱检测法的影响。结果显示:同品种不同产地的蚕丝间拉曼光谱没有明显差异;桑蚕丝与柞蚕丝的主要区别是二者酰胺 III 带的主峰位置分别出现在 $1\ 229\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 240\ \text{cm}^{-1}$, β -折叠构象的特征峰位置分别出现在 $1\ 084\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 094\ \text{cm}^{-1}$, 且柞蚕丝的拉曼光谱在 $905\ \text{cm}^{-1}$ 处有一独有特征峰, 因此通过显微共焦拉曼光谱技术可以实现桑、柞蚕丝之间的有效鉴别;桑蚕丝织物种类不影响其拉曼测试结果, 而桑蚕丝织物颜色是影响其拉曼测试结果的主要因素。

关键词: 拉曼光谱; 桑蚕丝; 柞蚕丝; 定性鉴别; 纤维; 织物

Identification and analysis of mulberry silk and its fabric based on micro confocal Raman spectroscopy

Xiong Jiaqi¹, Li Weidong¹, Nureli Adili², Zhu Anyu¹

1. Textile College, Donghua University, Shanghai/China

2. Cotton Public Inspection Room 2, Aksu Regional Fiber Inspection Institute, Aksu/China

Abstract: The confocal Raman spectroscopy was used to identify the fiber and fabrics of mulberry and tussah silk, and the influence of the types and colors of mulberry silk fabrics on Raman spectroscopy detection were analyzed. The results shows that there is no significant difference in Raman spectra between silks from the same variety and different regions. The principal differentiating factor between mulberry and tussah silk is the location of their main peak positions of the amide III band, which appear at $1\ 229\ \text{cm}^{-1}$ and $1\ 240\ \text{cm}^{-1}$, respectively. The sensitive peak of β -folding structure is observed at $1\ 084\ \text{cm}^{-1}$ and $1\ 094\ \text{cm}^{-1}$. Furthermore, the Raman spectrum of tussah silk exhibits a distinctive peak at $905\ \text{cm}^{-1}$. Consequently, the differentiation between mulberry and tussah silk can be achieved effectively through the confocal Raman spectroscopy technology. The type of mulberry silk fabric does not influence the Raman testing results, whereas the colour of mulberry silk fabric is the primary factor affecting the Raman testing results.

Keywords: Raman spectroscopy; mulberry silk; tussah silk; qualitative identification; fiber; fabric

拉曼光谱作为一种无损分析技术,已在包括法庭科学^[1-4]、农业^[5]、文物保护^[6]、宝石鉴定^[7]等领域得到应用。国内外用拉曼光谱研究桑蚕丝主要集中于

对蚕丝蛋白二级结构的研究,包括用拉曼光谱分析拉伸应力^[8]、温度^[9]、紫外光^[10]、pH 值^[11]和金属离子^[12-13]等因素对蚕丝结构与性能的影响,此外还有

利用拉曼光谱探究桑蚕丝与其他种类纤维之间鉴别的可行性^[14-16],但几乎没有研究提出通过对拉曼特征峰的分析来准确鉴别不同种类的蚕丝。显微共焦拉曼光谱技术是将显微分析技术与拉曼光谱分析技术相结合的一种应用技术^[17]。显微共焦拉曼光谱的最大优点是能够提高显微拉曼光谱的空间分辨率,除去杂乱的干扰信号和其对分析信号的影响。因此,本文通过显微共焦拉曼光谱技术比较桑、柞蚕丝及其织物的拉曼光谱,以期实现桑、柞蚕丝的鉴别,分析不同种类、颜色桑蚕丝织物的拉曼测试结果,探究影响拉曼光谱法检测桑蚕丝织物的主要因素。

1 试验部分

1.1 试验材料

桑蚕丝 s1~s10(产自浙江、安徽、四川、江苏、广西、西安、山东等地);柞蚕丝 s11~s13(产自辽宁和浙江);桑蚕丝织物样品 MSF-1~MSF-21(织物品种及颜色见表 1);柞蚕丝织物 TSF-01 和 TSF-02。

表 1 桑蚕丝织物种类及颜色

样品编号	品种	颜色
MSF-01	电力纺	白
MSF-02	电力纺	天蓝
MSF-03	电力纺	鹅黄
MSF-04	电力纺	玫红
MSF-05	电力纺	黑
MSF-06	电力纺	翠绿
MSF-07	电力纺	中国红
MSF-08	双绉	白
MSF-09	双绉	婴儿绿
MSF-12	素绉缎	白
MSF-13	素绉缎	桃肉
MSF-16	雪纺	白
MSF-17	雪纺	明黄
MSF-18	欧根纱	白
MSF-19	欧根纱	天蓝
MSF-20	针织网眼	白
MSF-21	针织单面平纹	白

1.2 试验仪器

美国 Thermo Fisher Scientific 的显微成像拉曼光谱仪,型号 DXR2xi,光谱分辨率 $<2\text{ cm}^{-1}$,激光器

波长 532 nm ,光谱分辨率 $<2\text{ cm}^{-1}$,空间分辨率 500 nm 。

1.3 样品制备及检测参数

蚕丝样品:随机剪取 5 根蚕丝用双面胶平行粘贴在载玻片上制成待检测样品;蚕丝织物样品:将织物尺寸裁剪为 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$,用双面胶粘贴在载玻片上制成待检测样品。拉曼光谱仪扫描范围设定为 $50\sim 3\,400\text{ cm}^{-1}$,扫描次数 1 000 次,共焦针孔 $25\text{ }\mu\text{m}$,激光功率为 7 mW ,曝光时间为 0.2 s ,每个样品在不同部位测试 3~4 次。

2 桑、柞蚕丝及其织物拉曼光谱特征比较及分析

2.1 不同产地桑蚕丝纤维的拉曼光谱

图 1 为 s1~s10 桑蚕丝的拉曼光谱图,在 $2\,933\text{ cm}^{-1}$ 附近和 $800\sim 1\,800\text{ cm}^{-1}$ 的范围内有明显的特征峰。 $2\,933\text{ cm}^{-1}$ 附近是亚甲基 C—H 键伸缩振动的拉曼特征峰,在 $800\sim 1\,800\text{ cm}^{-1}$ 范围内的是桑蚕丝主要结构信息的拉曼特征峰,包含了常用于分析蛋白质二级结构的酰胺 I 带(C=O 键伸缩、C—N 键伸缩)和酰胺 III 带(C—N 键伸缩、N—H 键平面内弯曲),可以反映蛋白质的主链构象^[18]。

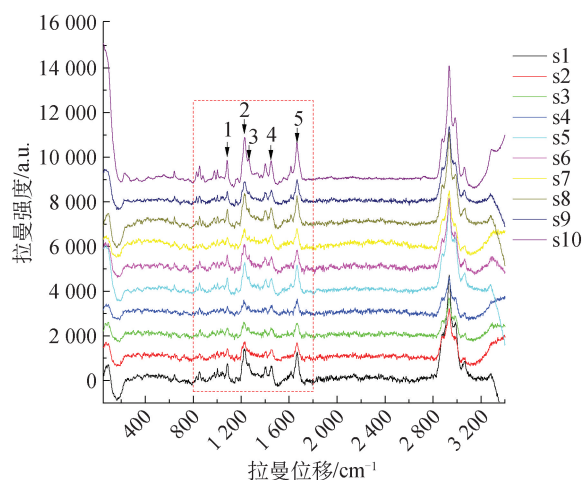


图 1 不同产地桑蚕丝(s1~s10)的拉曼光谱图

表 2 为桑蚕丝样品 s1~s10 的拉曼特征峰位置,其特征峰位置基本在 $1\,084.5\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,229.2\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,265.4\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,451.1\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,666.3\text{ cm}^{-1}$ 附近;由于实际测量中,拉曼光谱存在多种干扰源,特征峰

出峰位置会存在偏差,特征峰的标准偏差基本在 2 cm^{-1} 以内。在 $1\ 084.5\text{ cm}^{-1}$ 附近的特征峰由蛋白质多肽主链 C—C 键振动引起^[19], 归属于 β -折叠构象峰, $1\ 229.2\text{ cm}^{-1}$ 附近的特征峰归属于酰胺 III 带的 β -折叠结构, $1\ 265.4\text{ cm}^{-1}$ 附近的特征峰归属于酰胺

III 带的 α -螺旋结构, $1\ 451.2\text{ cm}^{-1}$ 附近的特征峰是由氨基酸侧链上 CH_2 和 CH_3 的弯曲振动引起的, $1\ 666.3\text{ cm}^{-1}$ 附近的特征峰归属于酰胺 I 带的 β -折叠结构^[20], 验证了桑蚕丝是以 β -折叠结构为主, 并含有少量 α -螺旋结构^[21]。

表 2 桑蚕丝的拉曼特征峰

样品编号	特征峰 1/ cm^{-1}	特征峰 2/ cm^{-1}	特征峰 3/ cm^{-1}	特征峰 4/ cm^{-1}	特征峰 5/ cm^{-1}
s1	1 084.1	1 228.8	1 263.5	1 450.5	1 666.5
s2	1 084.1	1 230.7	1 267.3	1 452.5	1 666.5
s3	1 084.1	1 228.8	1 263.5	1 448.6	1 668.5
s4	1 086.1	1 228.8	1 263.5	1 452.5	1 666.5
s5	1 086.1	1 230.7	1 265.4	1 452.5	1 666.5
s6	1 084.1	1 228.8	1 267.3	1 452.5	1 668.5
s7	1 084.1	1 228.8	1 267.3	1 452.5	1 664.6
s8	1 086.1	1 228.8	1 265.4	1 448.6	1 664.6
s9	1 084.1	1 228.8	1 265.4	1 450.5	1 666.5
s10	1 082.3	1 228.9	1 265.5	1 450.7	1 664.7
平均值	1 084.5	1 229.2	1 265.4	1 451.2	1 666.3
标准偏差	1.16	0.76	1.47	1.39	1.35

由图 1 和表 2 可知,不同产地的桑蚕丝拉曼光谱没有明显差异,都具有共同的拉曼特征峰,其峰形和位置基本一致。

2.2 不同品种蚕丝纤维的拉曼光谱

由图 2 桑蚕丝和柞蚕丝拉曼光谱对比图可以看到,桑蚕丝的拉曼光谱在酰胺 I 带表现为以 $1\ 666\text{ cm}^{-1}$ 为中心的特征峰和酰胺 III 带以 $1\ 229\text{ cm}^{-1}$ 为中心的特征峰,柞蚕丝的拉曼光谱在酰胺 I 带表现为以 $1\ 669\text{ cm}^{-1}$ 为中心的特征峰和酰胺 III 带以 $1\ 240\text{ cm}^{-1}$ 为中心的特征峰。

在桑蚕丝素蛋白氨基酸组成中,甘氨酸(Gly)含量最高,其次是丙氨酸(Ala)^[22],而在柞蚕丝中恰恰相反, $-(\text{Ala})_n-$ 链段是形成结晶区的主要单元,丙氨酸含量最高,甘氨酸含量其次,比例约为 42.24:28.03^[23]。相比桑蚕丝,柞蚕丝在 905 cm^{-1} 附近出现了一个特征峰,归属于 Ala 的拉曼特征峰,这一特征峰在桑蚕丝中不明显,据此可以区分桑蚕丝与柞蚕丝。

另外,桑蚕丝在酰胺 III 带的主峰出现在 $1\ 229\text{ cm}^{-1}$ 附近,归属于 β -折叠构象,而柞蚕丝在酰胺 III 带的主峰出现在 $1\ 240\text{ cm}^{-1}$ 附近,由主链的丙氨酸的振动造成;酰胺 I 带的主峰,在桑蚕丝拉曼光

谱中出现在 $1\ 666\text{ cm}^{-1}$ 附近,而在柞蚕丝拉曼光谱中则出现在 $1\ 669\text{ cm}^{-1}$ 附近,相对向右移动了几个单位,都属于 β -折叠构象的特征峰;同样归属于 β -折叠构象的特征峰在桑蚕丝($1\ 084\text{ cm}^{-1}$)和柞蚕丝($1\ 094\text{ cm}^{-1}$)的出峰位置也有所差异。

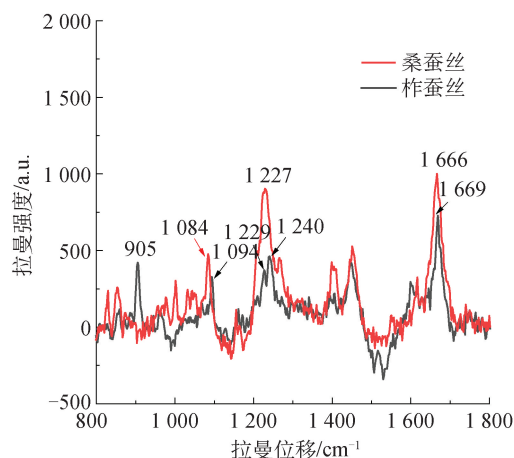


图 2 桑蚕丝与柞蚕丝的拉曼光谱对比图

图 3 为柞蚕丝 s11~s13 的拉曼光谱图,其特征峰位置在 905 cm^{-1} 、 $1\ 094\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 229\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 240\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 449\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 669\text{ cm}^{-1}$ 附近出现,不同产地柞蚕丝的拉曼光谱没有明显差异,因此同品种、不同产地的蚕丝无法通过拉曼特征峰峰形和位置进行区分,但不

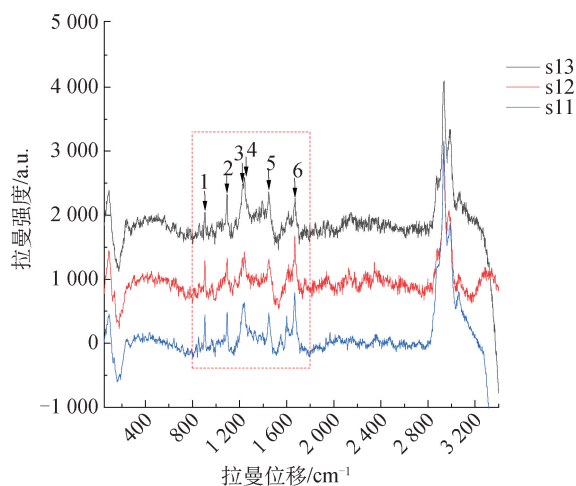


图3 不同产地柞蚕丝的拉曼光谱图

同品种(桑蚕丝和柞蚕丝)间的蚕丝可以通过显微共焦拉曼光谱技术进行鉴别。

2.3 不同蚕丝织物的拉曼光谱

图4和图5分别为桑蚕丝织物样品与柞蚕丝织物样品的拉曼光谱图,可见其织物的拉曼光谱特性、规律与纤维的基本保持一致,桑、柞蚕丝织物依然可以通过柞蚕丝拉曼光谱中 905 cm^{-1} 附近的特征峰和酰胺 III 带主峰位置区分。

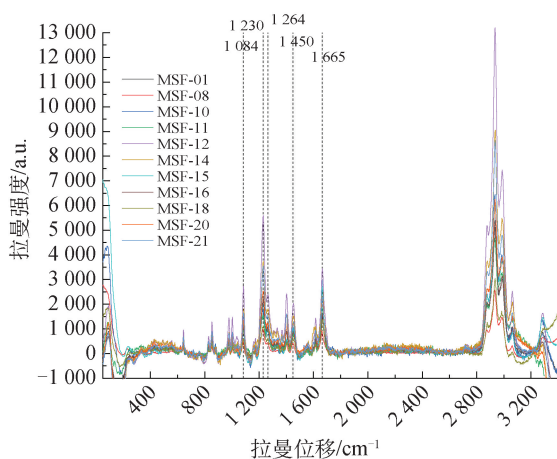


图4 桑蚕丝织物的拉曼光谱图

市场上出现的桑蚕丝产品主要以织物的形式呈现,拉曼光谱作为无损鉴别方法无需将织物拆分成纱线或纤维,而是直接从物质的分子结构层面进行分析,只要是同种组分,无论是纤维、纱线还是织物,其拉曼光谱特性与规律具有一致性,特征峰峰形和位置不会有差异。

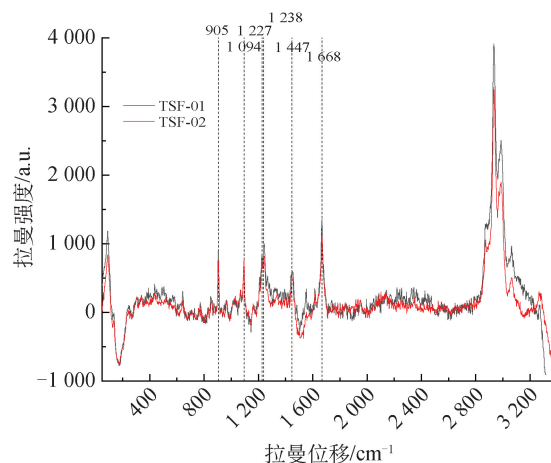


图5 柞蚕丝织物的拉曼光谱图

3 不同桑蚕丝织物对拉曼光谱影响的探究

利用拉曼光谱对桑蚕丝织物进行表征时,会受到某些因素的干扰,出现桑蚕丝拉曼信号不强、被较强荧光背景淹没等情况,为了探究影响桑蚕丝织物拉曼测试结果的因素,获得能提供稳定的桑蚕丝拉曼信息的桑蚕丝织物样品参数,将桑蚕丝织物的拉曼测试结果进行分类讨论。

3.1 桑蚕丝织物种类对拉曼光谱的影响

桑蚕丝织物具有不同的组织结构、外观特征及风格效果,本文选取桑蚕丝织物常见的11种白色纯桑蚕丝织物进行拉曼测试,结果如图6所示。

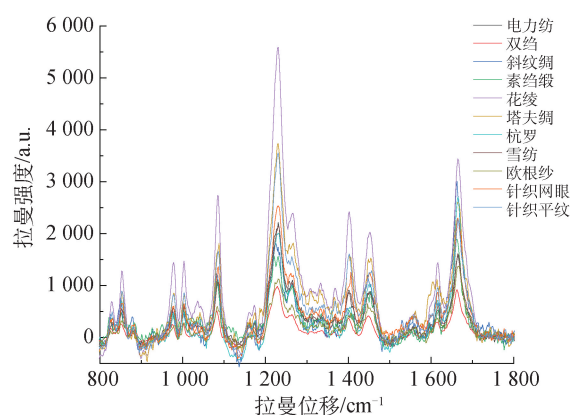


图6 不同种类桑蚕丝织物的拉曼光谱图

由图6可见,不同种类的桑蚕丝织物具有共同的拉曼特征峰,峰形和位置基本一致,但不同种类桑蚕丝织物在 $800\sim 1800\text{ cm}^{-1}$ 的峰段,其主峰位置和特征峰

峰强存在差异,表3集中了这11种桑蚕丝织物的拉曼测试数据,其中特征峰强度最高的是花绫,最低的是双绉,这是由于绫类织物有明显的斜纹纹路,而绉类桑蚕丝织物表面粗糙,对光的漫反射有影响^[24],从而对

拉曼光谱的强度产生不同影响。在800~1800 cm⁻¹区域,主峰主要在1231 cm⁻¹和1665 cm⁻¹两个位置附近出现,偏差在2 cm⁻¹以内,分别是酰胺 III 带和酰胺 I 带归属于β-折叠构象的特征峰。

表3 不同桑蚕丝织物种类对拉曼光谱的影响

样品编号	种类	拉曼定性测试结果	特征峰位置/cm ⁻¹	主峰位置/cm ⁻¹	主峰峰强/a.u.
MSF-01	电力纺	✓	1 084.1,1 230.7,1 265.6,1 449.6,1 664.6	1 230.7	2 214.4
MSF-08	双绉	✓	1 082.2,1 230.7,1 261.6,1 449.8,1 664.6	1 230.7	1 027.0
MSF-10	斜纹绸	✓	1 082.2,1 228.8,1 263.5,1 450.5,1 664.6	1 664.6	3 005.6
MSF-11	花绫	✓	1 083.8,1 230.4,1 263.2,1 452.1,1 664.3	1 230.4	5 589.6
MSF-12	素绉缎	✓	1 082.2,1 230.7,1 263.5,1 452.5,1 664.6	1 664.6	1 892.0
MSF-14	塔夫绸	✓	1 085.7,1 230.4,1 265.1,1 448.3,1 664.3	1 230.4	3 733.3
MSF-15	杭罗	✓	1 085.7,1 230.4,1 263.2,1 450.2,1 664.3	1 230.4	2 010.8
MSF-16	雪纺	✓	1 085.7,1 230.4,1 261.2,1 452.1,1 664.3	1 230.4	2 138.6
MSF-18	欧根纱	✓	1 083.8,1 230.4,1 263.2,1 446.4,1 666.2	1 666.2	1 367.2
MSF-20	针织网眼	✓	1 081.9,1 230.4,1 267.0,1 448.3,1 666.2	1 666.2	2 302.8
MSF-21	针织单面平纹	✓	1 083.8,1 230.4,1 263.2,1 452.1,1 666.2	1 230.4	3 553.0

注:拉曼定性测试结果代表样品能否通过拉曼特征峰位置和峰形鉴别为桑蚕丝,可以的情况打“✓”,否则记为“×”。

因此,不同种类白色纯桑蚕丝织物其拉曼特征峰的主峰位置和强度虽然有所不同,但是都具有桑蚕丝典型的拉曼特征峰,可以进行有效的鉴别。

3.2 桑蚕丝织物颜色对检测结果的影响

选取不同颜色的电力纺桑蚕丝织物,探究桑蚕丝织物颜色对拉曼光谱的影响,结果如图7所示,白色的桑蚕丝织物都能有效鉴别为桑蚕丝,但其他颜色的桑蚕丝织物的拉曼测试结果不理想,难以通过拉曼特征峰位置和峰形指认为桑蚕丝。

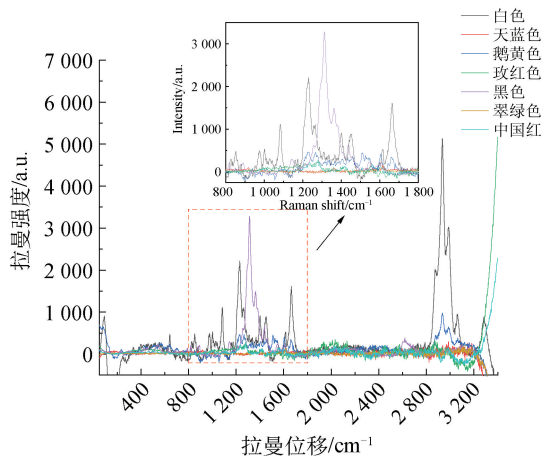


图7 不同颜色桑蚕丝电力纺织物的拉曼光谱

染色桑蚕丝织物的拉曼图谱主要出现两种情况,图8中MSF-05和MSF-13为电力纺和素绉缎的染色桑蚕丝织物,其拉曼光谱都受到很强的荧光干扰,拉曼信号弱,可能是由于染料中的某些荧光物质使桑蚕丝的特征峰淹没在荧光背景里,致使定性分析失败。

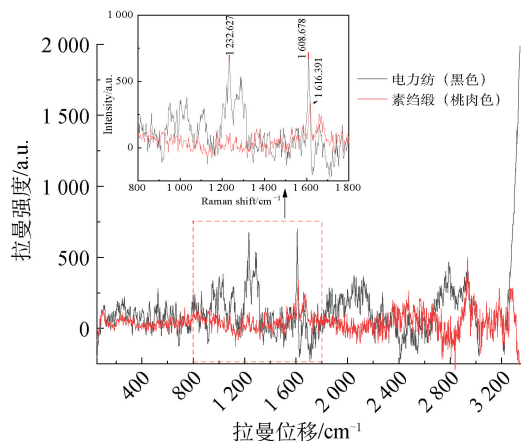


图8 染色桑蚕丝织物(MSF-05和MSF-13)的拉曼光谱

图9中染色桑蚕丝织物MSF-17(雪纺)和MSF-20(欧根纱)的拉曼光谱信号强,但显现出的拉曼峰来自于染料,桑蚕丝本身的峰被更强的染料的峰掩盖,无法鉴别出其成分是否为桑蚕丝。

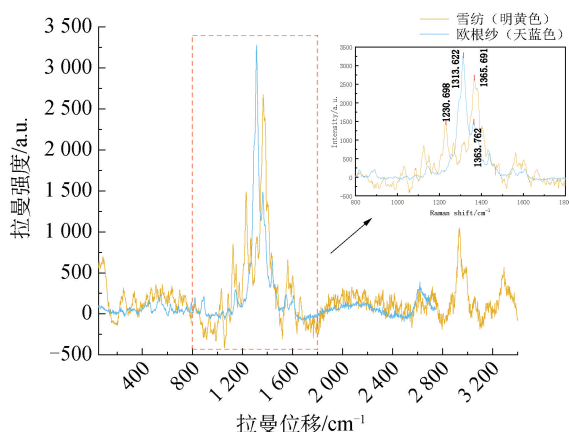


图9 染色桑蚕丝织物(MSF-17和MSF-20)的拉曼光谱

不同颜色桑蚕丝织物的拉曼光谱定性测试结果如表4所示,织物颜色对拉曼定性分析测试结果影响很大,白色桑蚕丝织物能通过拉曼光谱实现鉴别,有色桑蚕丝织物除了MSF-09,其余都没有桑蚕丝的有效拉曼信号,无法鉴别。

表4 桑蚕丝织物颜色对拉曼光谱的影响

样品编号	拉曼定性测试结果
MSF-01	✓
MSF-02	×
MSF-03	×
MSF-04	×
MSF-05	×
MSF-06	×
MSF-07	×
MSF-08	✓
MSF-09	✓
MSF-12	✓
MSF-13	×
MSF-16	✓
MSF-17	×
MSF-18	✓
MSF-19	×

因此,利用显微共焦拉曼光谱技术在532 nm激发波长下,可以对白色及部分浅色桑蚕丝织物进行快速、准确的定性鉴别,受织物颜色及染料干扰的织物只能进行脱色处理后再进行拉曼测试。尝试更多拉曼光谱激发波长或表面增强拉曼光谱等技术对染色纺织品进行鉴别^[25]是今后的研究方向。

4 结论

本文利用显微共焦拉曼光谱技术探究了桑、柞蚕丝纤维及其织物的鉴别和影响因素,结论如下。

——不同产地桑蚕丝间拉曼光谱没有明显差异,在 $1\ 084.5\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 229.2\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 265.4\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 451.1\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 666.3\ \text{cm}^{-1}$ 附近均有特征峰,偏差在 $2\ \text{cm}^{-1}$ 以内;

——桑蚕丝与柞蚕丝可以通过结合柞蚕丝在 $905\ \text{cm}^{-1}$ 的独有Ala特征峰,桑、柞蚕丝在酰胺III带主峰位置($1\ 229\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 240\ \text{cm}^{-1}$)的不同; β -折叠构象的特征峰位置($1\ 084\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 094\ \text{cm}^{-1}$)3方面的差异进行鉴别;

——白色蚕丝织物与桑蚕丝纤维的拉曼光谱特性和规律会保持一致,都具有桑蚕丝典型的拉曼特征峰,不同种类白色纯桑蚕丝织物拉曼特征峰的主峰位置和强度不同,在 $1\ 231\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 665\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现,偏差在 $2\ \text{cm}^{-1}$ 以内。

——利用显微共焦拉曼光谱技术,在532 nm激发波长下,织物种类不影响桑蚕丝织物的拉曼测试结果,桑蚕丝织物的颜色是影响其拉曼测试结果的主要因素。需实现拉曼光谱对染色桑蚕丝织物的有效鉴别时可以尝试改变激发波长或采用表面增强拉曼光谱技术,必要时则需要对桑蚕丝织物进行脱色等前处理。

基金项目:

- 1.科技部国家重点研发计划(2021YFF0601200);
- 2.上海市科委技术标准项目(21DZ2205800)。

参 考 文 献

- [1] 韩小燕.纤维颜色和染料的光谱学鉴别方法的综述[J].广东化工,2019,46(19):239-240.
- [2] SKOUPÁ V, JENIŠTOVÁ A, SETNÍČKA V, et al. Role of TiO_2 nanoparticles and UV irradiation in the enhancement of SERS spectra to improve levamisole and cocaine detection on Au substrates[J]. Langmuir, 2019, 35(13): 4540-4547.
- [3] MIRSAFAVI R, MOSKOVITS M, MEINHART C. Detection and classification of fentanyl and its precursors

- by surface-enhanced raman spectroscopy [J]. Analyst, 2020,145(9):3440-3446.
- [4] BURR D S, FATIGANTE W L, LARTEY J A, et al. Integrating sers and psi-ms with dual purpose plasmonic paper substrates for on-site illicit drug confirmation[J]. Analytical Chemistry, 2020,92(9):6676-6683.
- [5] 高振,赵春江,杨桂燕,等.典型拉曼光谱技术及其在农业检测中应用研究进展[J].智慧农业(中英文),2022,4(2):121-134.
- [6] 孙辉.拉曼光谱技术在纺织文物染料鉴定中的应用研究[J].文物鉴定与鉴赏,2023(1):142-145.
- [7] FAN J L, GUO S G, LIU X L. Application of raman spectrometer (785 nm) to jadeite test[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2007, 27(10): 2057-2060.
- [8] THIERRY L, FRANÇOIS P M, JEAN-FRANÇOIS R D, et al. Review structure of silk by raman spectromicroscopy: from the spinning glands to the fibers [J].Biopolymers,2012,97(6):322-36.
- [9] XIONG X Q, TANG Y H, XU C J, et al. High carbonization temperature to trigger enzyme mimicking activities of silk-derived nanosheets [J]. Small, 2020, 16(42):2004129-2004129.
- [10] 罗曦芸,叶菲,吴来明,等.便携式拉曼光谱用于文物及文物保护材料光老化作用的快速评价[J].光谱学与光谱分析,2010,30(9):2405-2408.
- [11] 谢桐,周平,邓风,等.pH 值对丝素蛋白构象转变的影响[J].高等学校化学学报,2004(5):961-965.
- [12] 韦军,朱亚伟,彭桃芝,等.丝胶固着蚕丝的红外光谱和拉曼光谱分析[J].印染助剂,2004(3):51-53.
- [13] 周文,黄郁芳,邵正中,等.铁和锰对桑蚕丝蛋白构象转变的影响[J].化学学报,2007(19):2197-2201.
- [14] 朱磊磊.拉曼光谱分析技术在纺织品检测上的应用[D].杭州:中国计量大学,2019.
- [15] 王建南,裔洪根,李娜.一种天然黄色家蚕丝的晶态结构研究[J].丝绸,2007(11):19-21.
- [16] CHO L L. Identification of textile fiber by raman microspectroscopy[J]. Forensic Science Journal, 2007, 6(1):55-62.
- [17] 吴淑焕.拉曼光谱在纺织品纤维成分快速分析中的应用[M].北京:电子工业出版社,2015:47.
- [18] 龚祖光.桑蚕丝蛋白的微纤化和物理凝胶化研究[D].上海:复旦大学,2011.
- [19] 程蕾,辛伟彪,刘祉序,等.碱脱胶法优化提取蚕丝素蛋白及其构象光谱[J].广西师范大学学报(自然科学版),2014,32(2):88-94.
- [20] CAREY P R, FAST P, KAPLAN H, et al. Molecular structure of the protein crystal from bacillus thuringiensis: a raman spectroscopic study[J].Biochimica Et Biophysica Acta (BBA) (Protein Structure and Molecular Enzymology),1986,872(3):169-176.
- [21] LI-CHAN E, NAKAI S, HIROTSUKA M. Raman spectroscopy as a probe of protein structure in food systems[M]//YADA R Y, JACKMAN R L, SMITH J L. Protein structure-function relationships in foods. New York: Springer New York, 1994: 163-197.
- [22] 程龙生,胡勿秋,王锦兰,等.柞蚕(Antherea pernyi)与桑蚕(Bombyx mori)丝心蛋白结构的研究[J].实验生物学报,1981(1):51-60.
- [23] 刘丽娜,左保齐.酶处理后丝素结构变化的拉曼光谱研究[J].国外丝绸,2006(5):7-9.
- [24] 吴俭俭,孙国君,戴连奎,等.纺织纤维拉曼光谱定性分析法[J].纺织学报,2011,32(6):28-33.
- [25] 王雅晨,孙其然,张清华,等.表面增强拉曼光谱检测单根有色纤维中染料探究[J].中国司法鉴定,2020(4):59-62.

OBHE 为可持续生产提供缩聚设备

江苏卡乐纺新材料有限公司已选择聚合装置系统制造商欧瑞康巴马格惠通(扬州)工程公司(OBHE)来提高其生产能力,卡乐纺将在 OBHE 的系统上用再生 PET 瓶片生产色纺纱线。

卡乐纺凭借其可持续发展理念已成为纺织行业的前驱,公司通过 GRS、BSCI 和 OEKO-TEX 等机

构的认证,为国际知名纺织品和体育用品制造商生产从回收熔体到纺织品表面的所有产品。

OBHE 提供的装置的产能为 3×180 t/d,使用回收瓶片用于纺织长丝的生产是对可持续纺丝工业的明确承诺。