

· 宝玉石矿物学 ·

基于太赫兹时域光谱技术的白色软玉产地 鉴定研究

杨婷婷¹, 王璇¹, 黄博陵¹, 臧子漪^{2,3}, 王洁^{2,3}, 颜识涵²

(1. 重庆市计量质量检测研究院, 国家珠宝首饰质量监督检验中心(重庆), 重庆 401123; 2. 中国科学院 重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 3. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 不同产地的白色软玉组成矿物成分和结构构造十分相近, 但价值差异很大。太赫兹(terahertz, THz)时域光谱技术可以提供物质的化学组成、结构及构像等信息, 光谱指纹特征信息可用于物质鉴别。利用透射式太赫兹时域光谱技术分别对新疆、韩国、青海和俄罗斯这4个产地的白色软玉进行了测试, 将得到的时域光谱进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)和计算后使用 Savitzky-Golay (S-G)平滑处理进行降噪, 得到4个产地白色软玉的0.2~2.5 THz频域内折射率和吸收系数。研究表明, 4个产地白色软玉THz光谱折射率存在数值差异; 不同产地太赫兹特征吸收峰的存在形式不同, 新疆、青海的白色软玉在2.0 THz波段有1个突出的小型特征吸收峰, 而韩国和俄罗斯的白色软玉在1.5~2.0 THz波段有1个宽大的吸收包络。这些结果为进一步开发基于太赫兹时域光谱技术的白色软玉产地识别方法提供了基础数据。

关键词: 太赫兹时域光谱; 吸收光谱; 折射率; 白色软玉; 产地

中图分类号: P619.28⁺3; P575.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)03-0314-09

Origin identification of white nephrite based on terahertz time-domain spectroscopy

YANG Ting-ting¹, WANG Xuan¹, HUANG Bo-ling¹, ZANG Zi-yi^{2,3}, WANG Jie^{2,3} and YAN Shi-han²

(1. National Jewelry Testing Center (Chongqing), Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 401123, China; 2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstracts: White nephrites of different origins are quite similar to each other in main mineral composition and structure, but their values vary greatly. Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) technology can not only provide information on chemical composition of substances but also provide spectral fingerprint information related to structure and conformation for substances identification. In this study, THz-TDS was used to test the white nephrite from four producing areas, i. e., Xinjiang, South Korea, Qinghai and Russia, whose refractive indexes and absorption coefficients in the frequency domain of 0.2~2.5 THz were obtained after fast Fourier transform (FFT) and calculation followed by Savitzky-Golay (S-G) smoothing. The results showed that the refractive indexes of the white nephrites from Xinjiang, South Korea, Qinghai and Russian were different. There was a small characteristic absorption at about 2.0 THz existing in the terahertz characteristics absorption spectra of white nephrites from Xinjiang and

收稿日期: 2019-07-03; 接受日期: 2020-02-14; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 重庆市质量技术监督局科研计划项目(CQZJKY2017025); 国家自然科学基金项目(61605206)

作者简介: 杨婷婷(1992-), 女, 硕士, 从事贵金属及珠宝玉石检测工作, E-mail: 812551273@qq.com; 通讯作者: 颜识涵(1985-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为太赫兹光谱检测技术, E-mail: yanshihan@cigit.ac.cn。

Qinghai, while a broad absorption envelope in 1.5 ~ 2.0 THz band was detected for the white nephrites from Korea and Russia. These results provide basic data for further development of the origin identification method of white nephrites based on terahertz time domain spectroscopy.

Key words: terahertz time-domain spectroscopy; absorption spectrum; refractive index; white nephrite; origin

Fund support: Scientific Research Project of Chongqing Bureau of Quality and Technology Supervision (CQZJKY2017025); National Natural Sciences Foundation of China (61605206)

软玉是以透闪石、阳起石及其类质同像系列矿物为主的矿物集合体,化学通式为 $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$, 密度约为 2.95 g/cm^3 , 摩氏硬度为 $6.0 \sim 6.5$ 。国内外研究表明,软玉的形成与接触交代、区域变质作用有关(Learning *et al.*, 1984; 邓燕华, 1991; Hawlow and Sorensen, 2005)。专家学者已对世界上重要产地(中国、西伯利亚、韩国、新西兰和俄罗斯等)的软玉矿床成因类型进行了不少研究,目前主要采用肉眼识别、显微放大、红光光谱检测等常规检测技术结合经验进行对软玉产地的鉴定(Cooper *et al.*, 1995; Harlow and Sorensen, 2005; Adams *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2011; Burtseva *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2017)。前人对软玉红外光谱的研究主要集中在对其红外光谱带归属的讨论上,如郭立鹤等(2002)研究了软玉中 M_1 、 M_3 阳离子占位的特点。虽然从矿物组分和显微结构方面对软玉产地进行鉴定是目前比较常见的鉴定方法,但由于不同产地的软玉矿物组分和显微结构相近,常规检测技术具有较大的经验性和不确定性,不能完全满足对软玉产地鉴定的需求,而软玉的产地直接影响其价值,因此亟需一种新型检测技术对软玉产地进行准确、客观的鉴定。

太赫兹(terahertz, THz)电磁波频率为 $0.1 \sim 10 \text{ THz}$, 位于微波和红外辐射之间,无线电领域称其为亚毫米波(sub-millimeter wave, SMMW),而光学领域称其为远红外辐射(far-infra-red, FIR)(Ozaki *et al.*, 2010),具有瞬时性、带宽性、相干性等特性。由于对分子间作用敏感,如晶体的晶格振动、分子间的低频振动模式等对应的频率均落在太赫兹频率范围内。以 THz 波作为探测光源发展而来的太赫兹时域光谱(terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS)技术是一种非接触测量技术,具有信噪比较高(戚淑叶等, 2012)、成本较低和简便易操作等特性,逐渐成为一种极具竞争力的无标记检测技术。Han 等(2017)曾通过太赫兹时域光谱技术研究斜绿泥石质玉,发现 0.8 、 0.96 、 1.2 THz 频率具有不同的太赫兹

光谱特征,将太赫兹时域光谱技术引入到了珠宝玉石研究中;买买提明·艾尼瓦尔等(2010)利用太赫兹时域光谱技术对羊脂白玉、青花玉和青玉进行了测试,结果显示不同颜色软玉的太赫兹时域谱图和折射率有较大差异。在这些研究的基础上,本文尝试利用太赫兹时域光谱技术,分别对新疆、韩国、青海和俄罗斯产出的白色软玉进行系统的分析,以期为进一步开发基于太赫兹时域光谱技术的白色软玉产地识别方法提供基础数据。

1 样品与测试

1.1 样品

本文来自新疆、韩国、青海和俄罗斯 4 个产地的 16 件样品均采购于新疆、河南、北京等玉石市场中。样品均具有各产地软玉代表性特征,为软玉中纯白至稍带灰、绿黄色调的白色软玉。其中,新疆产地 4 个白色软玉样品编号分别为 X-1、X-2、X-3 和 X-4,呈纯白色;俄罗斯产地 4 个白色软玉样品编号分别为 R-1、R-2、R-3、和 R-4,呈纯白色稍带黄绿色调;韩国产地 4 个白色软玉样品编号分别为 S-1、S-2、S-3 和 S-4,呈纯白色稍带黄绿色调;青海产地 4 个白色软玉编号分别为 Q-1、Q-2、Q-3 和 Q-4,呈纯白色。

据于海燕等(2019)研究可知,软玉中含有不同致色元素导致软玉颜色的不同,白色软玉中因含有微量 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和高价态 Mn 元素而稍带黄绿色调。Wang 等(2013)通过研究晶体中渗入离子对太赫兹波的影响,发现铁离子掺入铈酸锂晶体会影响基于光电效应产生的太赫兹波,同时其他金属元素的掺入也会对太赫兹波产生影响(Wang *et al.*, 2014)。由于探测端同样利用光电效应,白色软玉样品中金属元素的差异可能对同种晶体太赫兹光谱产生影响,因此为避免色调的差异引入误差,本文选取样品白色区域进行太赫兹时域光谱测试,同时,为避免因几何尺寸、形貌特征原因导致误差,制作标准厚度的白色软玉样品进行了后续分析。先将白色软玉样品

用有机黏合剂粘结在石英片上对样品进行切割,依次用 400#、600#、1 000#、1 500#砂纸对样品进行抛磨,然后用同样方法对样品另外一面进行抛磨,将样品厚度抛磨至 100 μm ,保证两表面平行且光滑无划

痕,最后使用丙酮溶液溶解有机黏合剂,将厚度为 100 μm 的样品从石英片上取下备测。经制备后的样品如图 1 所示,测试时避开样品裂隙处。

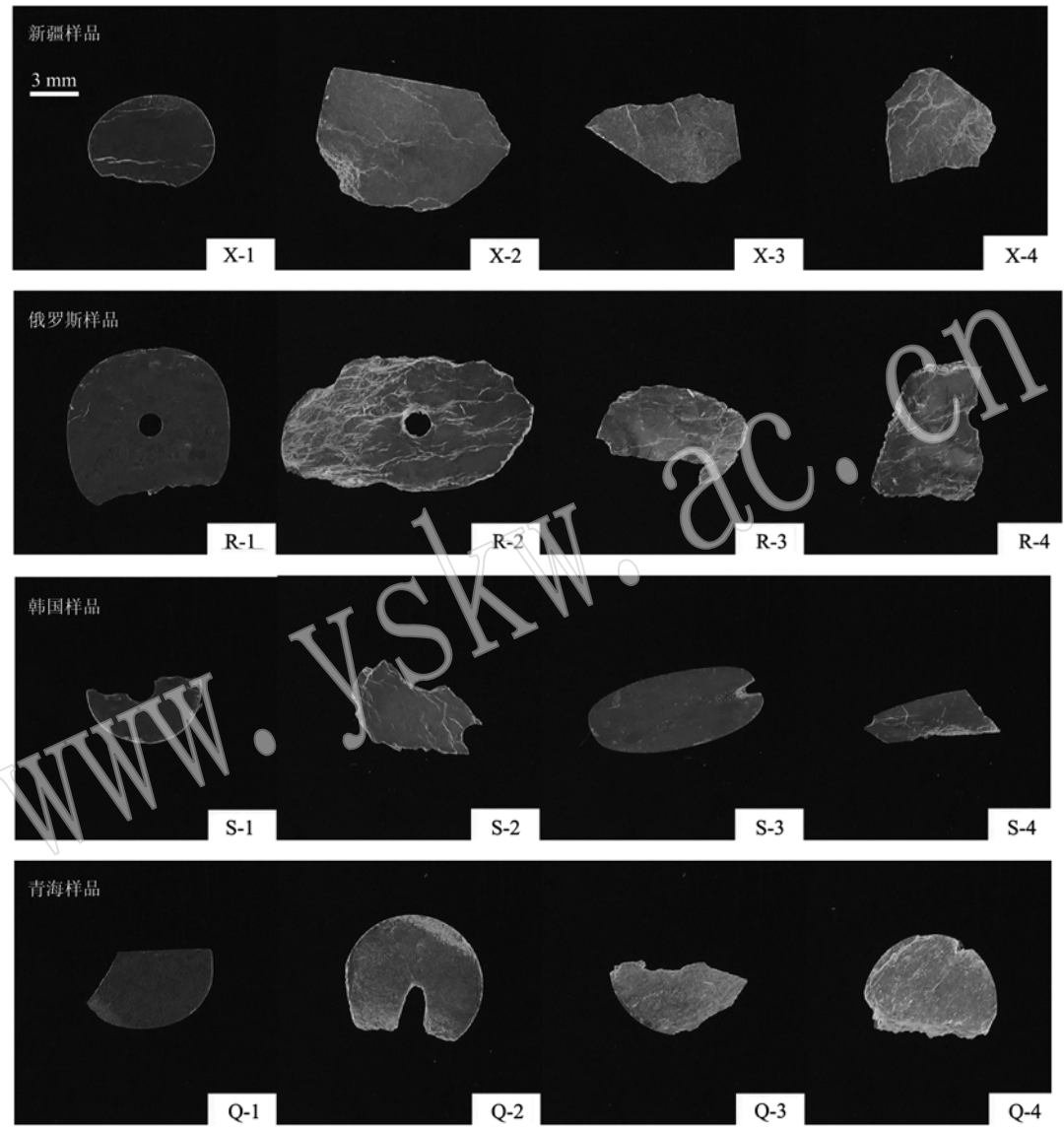


图 1 白色软玉样品切片照片
Fig. 1 Photograph of white nephrite slices

1.2 测试

为进一步确定样品信息,使用红外光谱反射法检测白色软玉的特征吸收峰。红外光谱测试在国家珠宝首饰质量监督检验中心(重庆)进行,测试系统为 Nicolet iS5(Thermo Scientific),激光器为温控固态近红外二极管激光器,中红外区射束分离器为 KBr/Ge,光谱范围为 400 ~ 500 cm^{-1} ,光谱分辨率优

于 0.8 cm^{-1} ,波数精度优于 0.01 cm^{-1} ,灵敏度小于 1×10^{-6} Abs。

太赫兹时域光谱分析采用 THz-TDS 设备系统进行,仪器分析原理如图 2 所示。该系统为中国科学院重庆绿色智能技术研究院 T-Ray 5000 太赫兹时域光谱探测系统,美国 Advanced Photonix, Inc. (API) 公司产品,由钛蓝宝石激光器产生飞秒脉冲激光,通过

光电导天线(PCA)产生探测太赫兹脉冲(李铁军等, 2018)。该系统的有效频率带宽为 0.1 ~ 3.5 THz, 频谱分辨率为 12.5 GHz, 快速扫描范围为 80 ps, 时间分辨率为 0.1 ps, 信噪比大于 70 dB。实验时为了避免空气中水蒸气的影响, 太赫兹发射器、接收器和被测样本均置于充有氮气的密封罩中, 测试环境的空气湿度约为 2%, 温度约为 21℃。为了消除仪器本身引起的实验误差, 每个样品测量 3 次求平均值。

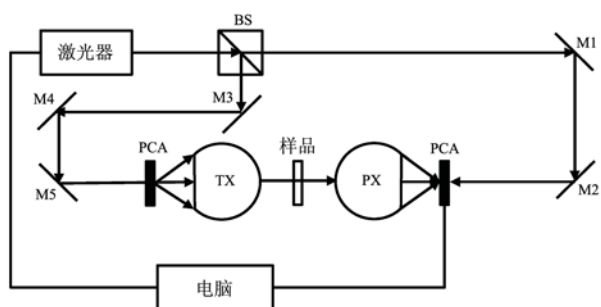


图2 API T-Ray 5000 太赫兹时域光谱原理图

Fig. 2 Schematic diagram of API T-Ray 5000 terahertz time-domain spectroscopy

1.3 数据处理

根据太赫兹时域光谱系统可测得样品太赫兹脉冲信号 $E_{\text{sam}}(t)$ 和参考脉冲信号 $E_{\text{ref}}(t)$, 然后分别对其进行傅里叶变换后得到频域谱, 样品信号和参考信号的傅里叶变换光谱分别为 $E_{\text{sam}}(\omega)$ 和 $E_{\text{ref}}(\omega)$ 。根据菲涅尔方程(Hua *et al.*, 2010)和光的传播方程, 得到复透射函数:

$$H(\omega) = E_{\text{sam}}(\omega)/E_{\text{ref}}(\omega) \quad (1)$$

通过样品的相位信息和振幅信息, 进而得到频域内的折射率、消光系数和吸收系数的光学参数(Chen *et al.*, 2015; Qin *et al.*, 2017), 其计算公式分别为:

$$n(\omega) = \varphi(\omega)c/\omega d + 1 \quad (2)$$

$$k(\omega) = (c/\omega d) \ln \{4n(\omega)/\rho(\omega)[n(\omega) + 1]^{-2}\} \quad (3)$$

$$a(\omega) = 2\omega k(\omega)/c = (2/d) \ln \{4n(\omega)/\rho(\omega)[n(\omega) + 1]^{-2}\} \quad (4)$$

式中, ω 为角频率, d 为白色软玉样品的厚度, c 为光速, $n(\omega)$ 为样品的折射率, $a(\omega)$ 为样品的吸收系数, $\rho(\omega)$ 为样品信号与参考信号的幅度比, $\varphi(\omega)$ 为样品信号与参考信号的相位差, $k(\omega)$ 为消光系数。

由于原始吸收谱数据包含系统、光散射和数据处理导致的噪声, 本文使用 Savitzky-Golay 滤波拟合法(S-G)对数据进行了平滑滤波处理, 可降低噪声的

干扰, 能够有效提高光谱平滑性。S-G 滤波器是一种常见的低通滤波器, 可以较好地去除噪声并保留大部分原始信息(杨玉平等, 2019)。

2 结果与分析

2.1 红外光谱分析

首先对 4 个产地的 16 件白色软玉样品进行了红外光谱反射测试, 获取的光谱信息经过 K-K 变换, 结果如图 3 所示。由图 3 可见, 在 3 700 ~ 3 600、1 200 ~ 900、800 ~ 600 和 600 ~ 400 cm^{-1} 处均有吸收。对白色软玉的这些吸收峰进行了平均计算, 具体吸收峰位置及归属如表 1 所示。

在高频区, 样品在 3 600 ~ 3 700 cm^{-1} 都有吸收峰的出现, 此段峰值为透闪石中 OH 基的伸缩振动, 与透闪石结构中 2 个 M_1 位和 1 个 M_2 位的 M—OH 伸缩振动有关(杨林等, 2013)。由表 1 可知, 样品的主要吸收峰出现在 1 200 ~ 900、800 ~ 600 和 600 ~ 450 cm^{-1} , 与透闪石的标准谱线数据基本一致, 表明新疆、韩国、青海、俄罗斯产的白色软玉主要矿物为透闪石, 4 个产地白色软玉的矿物成分没有明显差别, 而红外光谱的优势在于区分不同矿物中的元素、配位基和络阴离子, 不能直接识别构象的差异, 因此, 不同产地白色软玉红外光谱区分度不高。

2.2 太赫兹光谱分析

样品的太赫兹时域光谱实验结果显示, 不同产地白色软玉的时域信号振幅和时延不尽相同(图 4), 在样品厚度一致的前提下, 由于吸收系数不同, 其振幅不同; 而折射率不同, 时延不同(于宪书, 2016)。所有样品均采用太赫兹透射模式进行了测试, 根据公式(1)和(2)计算得到了样品在 0.2 ~ 2.5 THz 波段折射率及吸收系数随频率变化的关系。图 5 为不同产地白色软玉在 0.2 ~ 2.5 THz 波段的太赫兹吸收光谱图。虽然由于样品内的多重反射造成了周期性的震荡, 但从图 5 中依然可以看出不同种类的白色软玉特征吸收峰具有差异性, 新疆、青海的白色软玉在 2.0 THz 波段有 1 个突出的小型特征吸收峰, 而韩国和俄罗斯的白色软玉在 1.5 ~ 2.0 THz 波段有 1 个宽大的吸收包络。

图 6 为不同产地白色软玉在 0.2 ~ 2.5 THz 波段折射率谱图。表 2 列出了不同产地的白色软玉在 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 THz 处的折射率。从图 6 和表 2 可知, 不同产地的白色软玉其折射率有较大

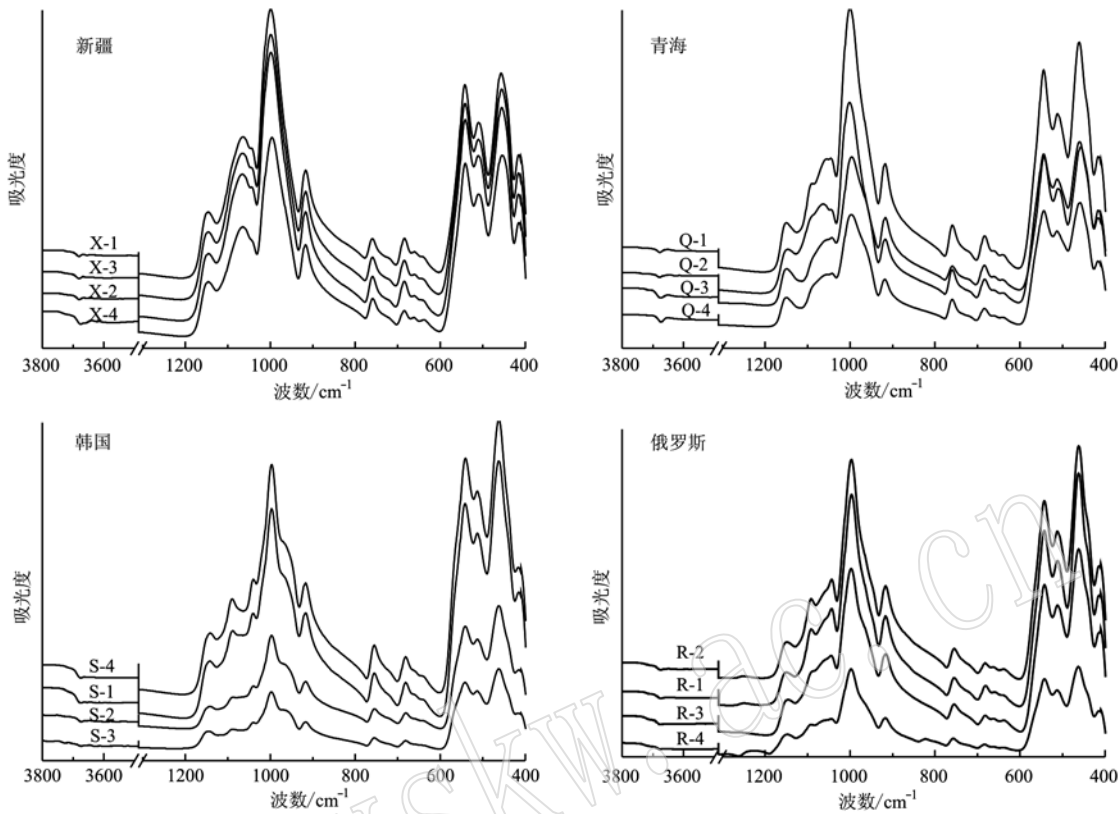


图 3 不同产地白色软玉红外反射光谱

Fig. 3 Infrared reflection spectra of white nephrites of different origins

表 1 不同产地白色软玉红外吸收峰的位置及归属 cm^{-1}

Table 1 Location and attribution of infrared absorption peaks of white nephrites of different origins

产地	新疆	韩国	青海	俄罗斯
M—OH 伸缩振动谱带	3 671	3 671	3 671	3 671
O—Si—O 和 Si—O—Si 的反	1 145	1 145	1 150	1 150
对称伸缩振动及 O—Si—O	—	1 090	1 090	1 089
对称伸缩振动	1 040	1 040	1 042	1 040
	1 000	998	1 000	999
	916	916	916	916
Si—O—Si 的对称伸缩振动	760	755	760	755
	680	681	680	683
Si—O 的弯曲振动及 M—OH	541	543	540	541
的晶格振动	461	460	460	461

差别,新疆、俄罗斯、韩国、青海的折射率依次降低,新疆白色软玉折射率为 3.4 左右,俄罗斯白色软玉折射率为 2.8 左右,韩国白色软玉折射率为 2.4 左右,青海白色软玉折射率为 1.5 左右。白色软玉太赫兹折射率同一产地组内差异小于不同产地组间差异。实验结果初步表明新疆、青海、韩国、俄罗斯产出的白色软玉(白玉)的太赫兹时域光谱特征具有区

别。结合不同太赫兹光谱特征参数分析可以获得更加具有区分度的结果,这表明可以采用多种太赫兹时域光谱特征参数联合分析来区分不同产地的白色软玉。

2.3 分析讨论

据前人研究,新疆和青海软玉是由中酸性岩浆和镁质碳酸盐岩的接触交代形成(刘飞等, 2009; 韩冬等, 2018),而韩国和俄罗斯软玉是由中酸性岩浆和白云质大理岩的接触交代形成(张晓晖等, 2001; 裴祥喜, 2012),虽然其化学成分和结构构造具有明显相似性(毛德宝等, 2003, 2006; 周征宇等, 2005; 刘飞等, 2009; 裴祥喜, 2012),但新疆、青海、韩国和俄罗斯软玉内岩相结构还是存在一定的区别(程丽, 2012)。新疆软玉常见的岩相结构是纤维交织变晶结构和平行纤维变晶结构,韩国软玉常见的岩相结构是中粗粒粒状变晶结构,青海软玉常见的岩相结构是显微片状结构等,俄罗斯软玉常见的岩相结构是显微鳞片状变晶结构。

在太赫兹频率内,吸收主要来自于低能量的分子间振动(主要包括分子间氢键振动模式和晶体声

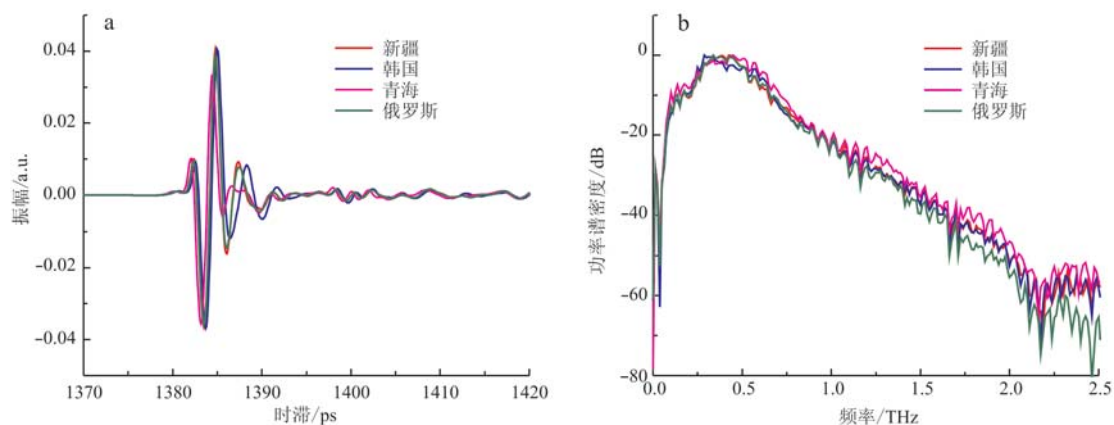


图4 不同产地白色软玉太赫兹时域谱图(a)和频域谱图(b)

Fig. 4 THz time domain spectra (a) and THz frequency domain spectra (b) of white nephrites of different origins

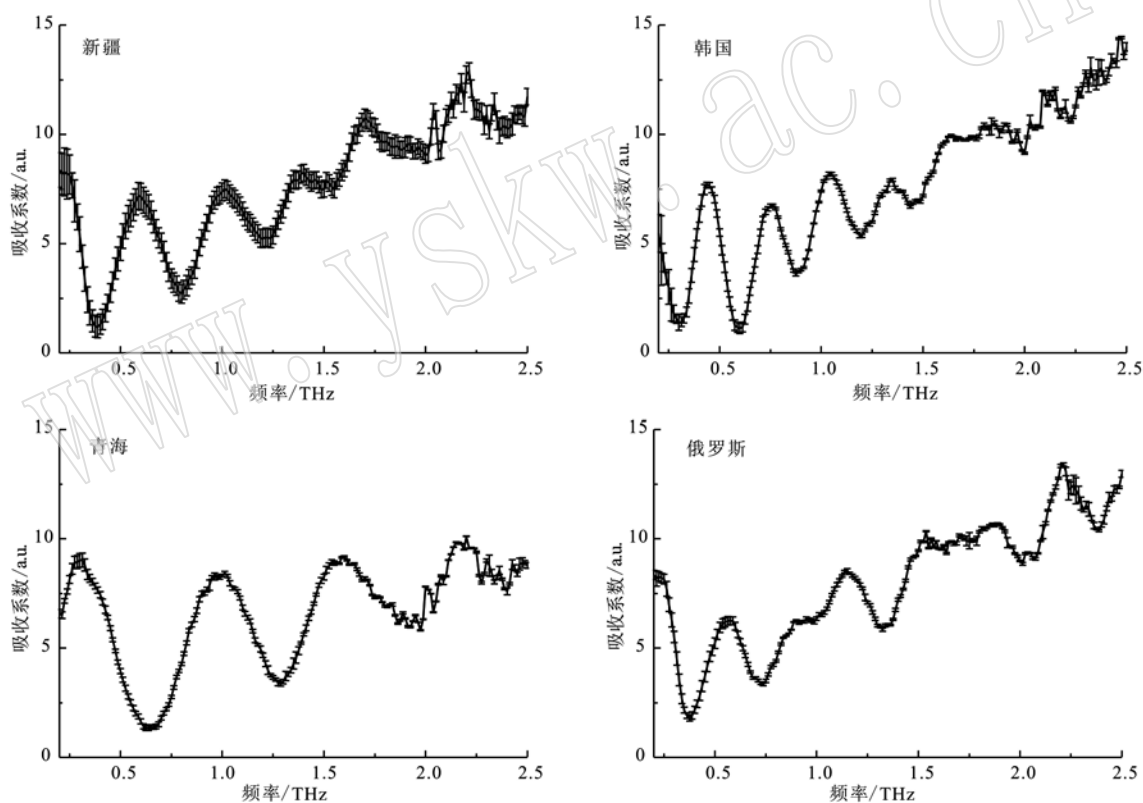


图5 不同产地白色软玉太赫兹吸收光谱图

Fig. 5 Terahertz absorption coefficient of white nephrites from different origins

子振动模式),同时,晶体本征微结构特征会反映在晶体太赫兹吸收峰位置分布排列组合上(Li *et al.*, 2010),定向无序和有序相物质的太赫兹吸收光谱能反映无序局域旋转模式和晶格振动模式(Nickel *et al.*, 2015)。此外,同种晶体颗粒的粒径及形状差异都影响太赫兹吸收光谱特征(Yamauchi *et al.*,

2013; Burnett *et al.*, 2013),且晶体颗粒间不同的孔隙度也可能对太赫兹光谱参数造成影响(Ye *et al.*, 2019),太赫兹共振吸收响应不仅与分子组成有关,而且还对分子的晶体结构、晶粒大小及分子间相互作用等因素非常敏感(Shi *et al.*, 2018)。因此,笔者推测白色软玉对太赫兹辐射的响应主要来自于分子

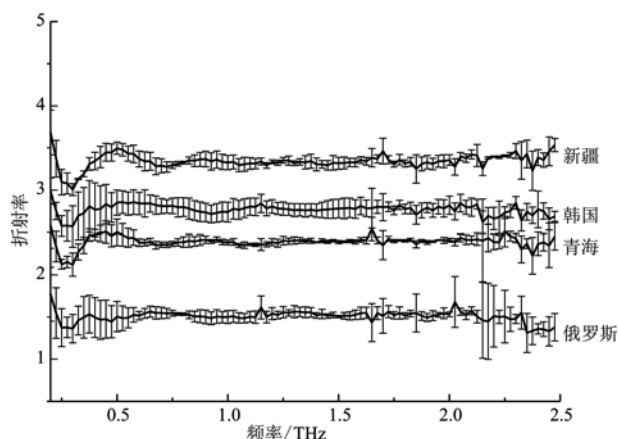


图6 白色软玉折射率谱图

Fig. 6 The terahertz refractive index of white nephrites

表2 白色软玉的折射率

Table 2 The refractive index of white nephrites

产地	0.5 THz	1.0 THz	1.5 THz	2.0 THz	2.5 THz
新疆	3.497	3.326	3.318	3.357	3.534
俄罗斯	2.852	2.740	2.780	2.819	2.687
韩国	2.501	2.384	2.391	2.411	2.454
青海	1.506	1.500	1.505	1.532	1.378

的低频集体振动模式和晶体颗粒的形状、粒径和孔隙度的差异,不同产地的白色软玉,其化学成分、矿物组分、显微结构有细微差别均可体现在太赫兹光谱响应中。

3 结论

对新疆、韩国、青海和俄罗斯的白色软玉进行的太赫兹时域光谱测试结果表明,新疆、俄罗斯、韩国、青海白色软玉的折射率依次降低,由大约3.4、2.8、2.4降为1.5;新疆、青海的白色软玉在2.0 THz波段有1个突出的小型特征吸收峰,而韩国和俄罗斯的白色软玉在1.5~2.0 THz波段有1个宽大的吸收包络,该结果可应用于鉴定白色软玉产地。本研究为太赫兹时域光谱技术识别白色软玉产地的应用打下了基础,继续研究含透闪石类矿物以及更多种类玉石在太赫兹波段的吸收光谱特征将有助于解释产地差异来源,提高鉴定的科学性及准确性。

References

Adams C J, Beck R J and Campbell H J. 2007. Characterisation and origin of New Zealand nephrite jade using its strontium isotopic signa-

ture[J]. *Lithos*, 97(3): 307~322.

Burnett A D, Kendrick J, Russell C, *et al.* 2013. Effect of molecular size and particle shape on the terahertz absorption of a homologous series of tetraalkylammonium salts[J]. *Analytical Chemistry*, 85(16): 7 926~7 934.

Burtseva M V, Ripp G S, Posokhov V F, *et al.* 2015. Nephrites of East Siberia: Geochemical features and problems of genesis[J]. *Russian Geology & Geophysics*, 56(3): 402~410.

Chen Z, Zhang Z, Zhu R, *et al.* 2015. Application of terahertz time-domain spectroscopy combined with chemometrics to quantitative analysis of imidacloprid in rice samples[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 167: 1~9.

Cheng Li. 2012. Comparative Studies on the Nephrites from Four Different Areas[D]. Qinhuangdao: Yanshan University (in Chinese).

Cooper A F. 1995. Nephrite and metagabbro in the Haast Schist at Muddy Creek, northwest Otago, New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology & Geophysics*, 38(3): 325~332.

Deng Yanhua. 1991. *Geology of Gem Deposit*[M]. Beijing: Beijing University of Technology, 104~112(in Chinese).

Guo Lihe and Han Jingyi. 2002. The IR analyses of M_1 and M_3 cation occupation of Hetian jade, Manasi green jade and Xiuyan old jade [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(S1): 68~71(in Chinese).

Han D, Jeong H, Song Y, *et al.* 2017. Lattice vibrations of natural seraphinite gemstone probed by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 5(6): 1 021~1 027.

Han Dong, Liu Xifeng, Liu Yan, *et al.* 2018. Genesis of dolomite-related nephrite from Hetian and color-forming factors of typical nephrite in Hetian, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(6): 1 011~1 026(in Chinese with English abstract).

Harlow G E and Sorensen S S. 2005. Jade (nephrite and jadeitite) and serpentinite: Metasomatic connections[J]. *International Geology Review*, 47(2): 113~146.

Hua Y, Zhang H and Zhou H. 2010. Quantitative determination of cyfluthrin in N-Hexane by terahertz time-domain spectroscopy with chemometrics methods[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(5): 1 414~1 423.

Learning S F. 1984. Jade in British Columbia and Yukon Territory[J]. *Geological Survey of Canada*, 29: 270~273.

Li R, Zeitler J A, Tomerini D, *et al.* 2010. A study into the effect of subtle structural details and disorder on the terahertz spectrum of

- crystalline benzoic acid[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 12(20): 5 329 ~ 5 340.
- Li Tiejun, Sun Yue, Shao Guifang, *et al.* 2018. Terahertz nondestructive detection method of ceramic matrix composites[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 55(6): 198 ~ 207(in Chinese).
- Liu Fei and Yu Xiaoyan. 2009. Classification and mineralogical characteristics of nephrite deposits in China[J]. *Mineral Resources and Geology*, 23(4): 375 ~ 380(in Chinese).
- Liu Y, Deng J, Shi G, *et al.* 2011. Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite from Hetian, Xinjiang, Northwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 41(1): 122 ~ 132.
- Maimaitiming Ainiwaer, Xiong Wei, Guo Xuejiao, *et al.* 2010. Study on terahertz spectroscopy of Hetan Jade[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 30(10): 2 597 ~ 2 600(in Chinese).
- Mao Debao, Wang Kezhao, Zhong Changting, *et al.* 2003. Metallogenic series and geological characteristics in the Altun metallogenic belt [J]. *Geology and Exploration*, (5): 1 ~ 5(in Chinese).
- Mao Debao, Zhong Changting, Niu Guanghua, *et al.* 2006. Study on metallogenic characteristics and target areas in the Altyn Tagh metallogenic zone[J]. *Northwestern Geology*, (2): 114 ~ 127(in Chinese).
- Nickel D V, Ruggiero M T, Korter T M, *et al.* 2015. Terahertz disorder-localized rotational modes and lattice vibrational modes in the orientationally-disordered and ordered phases of camphor[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics* *Peep.*, 17(10): 6 734 ~ 6 740.
- Ozaki T, Blanchard F, Sharma G, *et al.* 2010. THz imaging and spectroscopy using intense THz sources at the advanced laser light source [J]. *Physics Procedia*, 5(part-PA): 119 ~ 124.
- Pei Xiangxi. 2012. Study on the Chuncheon Nephrite Deposit, Korea[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Qi Shuye, Zhang Zhenwei, Zhao Kun, *et al.* 2012. Evaluation of walnut by terahertz nondestructive technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(12): 3 390 ~ 3 393(in Chinese).
- Qin B, Li Z, Luo Z, *et al.* 2017. Terahertz time-domain spectroscopy combined with PCA-CFSFDP applied for pesticide detection[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 49(7): 244.
- Shi C, Ma Y, Zhang J, *et al.* 2018. Terahertz time-domain spectroscopy of chondroitin sulfate[J]. *Biomedical Optics Express*, 9(3): 1 350.
- Wang Y, Ni H, Zhan W, *et al.* 2013. Electro-optical detection of THz radiation in Fe implanted LiNbO₃[J]. *Optical Materials*, 35(3): 596 ~ 599.
- Wang Y, Wang R, Yuan J, *et al.* 2014. Terahertz generation from Cu ion implantation into lithium niobate[J]. *Journal of Luminescence*, 147: 242 ~ 244.
- Yamauchi S, Hatakeyama S, Imai Y, *et al.* 2013. Nondestructive evaluation of crystallized-particle size in lactose-powder by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Optical Engineering*, 53(3): 031203.
- Yan S, Zhang H, Yang Z, *et al.* 2017. Transformation and dehydration kinetics of methylene blue hydrates detected by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *RSC Advances*, 7(66): 41 667 ~ 41 674.
- Yang Lin, Lin Jinhui, Wang Lei, *et al.* 2013. IR spectrum characteristics and significance of Luodian Jade from Guizhou[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(8): 2 087 ~ 2 091(in Chinese).
- Yang Yuping, Zhang Cheng, Liu Haishun, *et al.* 2019. Identification of two types of safflower and bezoar by terahertz spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 39(1): 45 ~ 49(in Chinese).
- Ye D, Wang W, Zhou H, *et al.* 2019. In-situ evaluation of porosity in thermal barrier coatings based on the broadening of terahertz time-domain pulses: Simulation and experimental investigations[J]. *Opt. Express*, 27(20): 28 150 ~ 28 165.
- Yu Haiyan, Ruan Qingfeng, Sha Xin, *et al.* 2019. Study on color-causing elements in Qinghai nephrite by elemental analysis and electron paramagnetic resonance spectroscopy[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 38(3): 288 ~ 296(in Chinese).
- Yu Xianshu. 2016. Research on Lubricating Oil and N-alkanes at Different Temperatures with Terahertz Time-domain Spectroscopy Technology[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing) (in Chinese).
- Zhang Xiaohui, Wu Ruihua and Wang Leyan. 2001. Research in petrological character of nephrite jade from Baikal Lake Region in Russia [J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 1: 12 ~ 17, 53(in Chinese).
- Zhou Zhengyu, Liao Zongting, Ma Tingting, *et al.* 2005. Study on ore-forming type and genetic mechanism of Sanchakou Nephrite Deposit in Qinghai Province[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, (9): 1 191 ~ 1 194(in Chinese).

附中文参考文献

- 程 丽. 2012. 四种产地软玉的比较研究[D]. 河北. 燕山大学.
- 邓燕华. 1991. 宝(玉)石矿床[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 104 ~ 112.
- 郭立鹤, 韩景仪. 2002. 和田玉、玛纳斯碧玉和岫岩老玉中 M₁、M₃ 阳离子占位的红外光谱分析[J]. *岩石矿物学杂志*, 21(S1): 68 ~

- 71.
- 韩冬,刘喜锋,刘琰,等. 2008. 新疆和田地区大理岩型和和田玉的形成及致色因素探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 37(6): 1 011 ~ 1 026.
- 李铁军,孙跃,邵桂芳,等. 2018. 陶瓷基复合材料的太赫兹无损检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 55(6): 198 ~ 207.
- 刘飞,余晓艳. 2009. 中国软玉矿床类型及其矿物学特征[J]. 矿产与地质, 23(4): 375 ~ 380.
- 买买提明·艾尼瓦尔,熊伟,郭雪娇,等. 2010. 和田玉的太赫兹光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 30(10): 2 597 ~ 2 600.
- 毛德宝,王克卓,钟长汀,等. 2003. 阿尔金成矿带主要成矿系列及其地质特征[J]. 地质与勘探, (5): 1 ~ 5.
- 毛德宝,钟长汀,牛广华,等. 2006. 阿尔金成矿带成矿规律与找矿预测[J]. 西北地质, (2): 114 ~ 127.
- 裴祥喜. 2012. 韩国春川软玉矿床研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 戚淑叶,张振伟,赵昆,等. 2012. 太赫兹时域光谱无损检测核桃品质的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 32(12): 3 390 ~ 3 393.
- 杨林,林金辉,王雷,等. 2013. 贵州罗甸玉红外光谱特征及意义[J]. 光谱学与光谱分析, 33(8): 2 087 ~ 2 091.
- 杨玉平,张成,刘海顺,等. 2019. 两类红花和牛黄的太赫兹光谱法真伪鉴别分析[J]. 光谱学与光谱分析, 39(1): 45 ~ 49.
- 于海燕,阮青锋,沙鑫,等. 2019. 应用元素分析-电子顺磁共振能谱研究不同颜色青海软玉致色元素[J]. 岩矿测试, 38(3): 288 ~ 296.
- 于宪书. 2016. 变温条件下润滑油和正构烷烃的太赫兹时域光谱研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京).
- 张晓晖,吴瑞华,王乐燕. 2001. 俄罗斯贝加尔湖地区软玉的岩石学特征研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 1: 12 ~ 17, 53.
- 周征宇,廖宗廷,马婷婷,等. 2005. 青海三岔口软玉成矿类型及成矿机制探讨[J]. 同济大学学报(自然科学版), (9): 1 191 ~ 1 194.