

·宝石矿物学·

# 宝石的红外反射光谱及红外光谱鉴定系统

郭立鹤<sup>1</sup>, 韩景仪<sup>1</sup>, 罗红宇<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 公安部 防伪产品质量监督检验中心, 北京 100038)

**摘要:** 红外透射光谱技术是当前鉴别翡翠是否有聚合物充填的最好方法, 而红外反射光谱技术是一种快速、无损伤的测试方法, 主要提供矿物的基频振动光谱信息, 在宝石学研究方面特别是鉴定宝石种属方面显示出新的应用可能性。本文介绍红外反射光谱技术的宝石学应用和包含 318 个光谱的数据库以及检索、鉴定程序的宝石红外光谱鉴定系统。

**关键词:** 红外反射光谱技术; 宝石鉴定; 宝石数据库

中图分类号: P579; P575.4      文献标识码: A      文章编号: 1000-6524(2006)04-0349-08

## The Infrared reflectance spectra and the identification system of gems

GUO Li-he<sup>1</sup>, HAN Jing-yi<sup>1</sup> and LUO Hong-yu<sup>2</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Anti-counterfeiting Product Quality Supervision &amp; Test Center, Ministry of Public Security, Beijing 100038, China)

**Abstract:** At present, the infrared transmission spectroscopy is the best technique for determining whether jadeite is polymer-impregnated or not, and the infrared reflectance spectroscopy is a nondestructive and rapid determination method that provides mainly the fundamental frequency vibration spectra data of minerals and shows new application potentials in gemological research, especially in the identification of gem species. The gemological application of IR reflectance spectroscopy and the identification system of IR spectra of gems, including a database of 318 spectra and a searching and identifying program, are described in this paper.

**Key words:** infrared reflectance spectroscopy; identification of gems; database of gems

由于红外光谱技术具有测量速度快、信息准确可靠的特点, 早已被用于宝石学研究, 近 10 多年来又发现了一些重要的应用 (Johnson, 2000)。红外光谱技术是确定翡翠是否有聚合物注入的最佳技术 (Fritsch *et al.*, 1992; 郭立鹤, 1994), 在了解祖母绿中不同形式的 OH 及水 (Schmetzer *et al.*, 1990)、鉴别祖母绿中的充填物 (Kiefert *et al.*, 1999)、研究天然、合成及加热处理红 (蓝) 宝石 (Peretti *et al.*, 1995; Smith, 1995; 刘红霞等, 2001)、研究天然及合成金刚石中的 H 和 N (Fritsch and Scarratt, 1992; Shigley *et al.*, 1995; Weldon, 1999; 元利剑等,

2001)、鉴别天然及合成玻璃 (Owens, 1999) 等方面都取得了新的进展。以上宝石学研究是使用透过光谱法在宝石晶体上测量的, 红外辐射要穿过测试样品再到探测器, 得到的主要是与样品中结构水的 H—O 键、有机包体及优化处理宝石使用的有机物质的 C—H 伸缩振动有关的短波区段 ( $> 2\,000\text{ cm}^{-1}$ ) 的光谱信息。由于宝石样品的厚度太大使透射光谱小于  $2\,000\text{ cm}^{-1}$  区间的长波信息达到饱和, 导致大多数宝石矿物 (金刚石除外) 的基频振动信息几乎完全丢失。宝石种属的鉴定信息主要是在小于  $2\,000\text{ cm}^{-1}$  区间的长波段, 使用 KBr 混合压片测量可以获

收稿日期: 2006-02-22; 修订日期: 2006-03-31

作者简介: 郭立鹤 (1939- ), 男, 研究员, 主要从事矿物红外光谱研究, E-mail: glh39@yahoo.com.cn。

得该波段的光谱信息,但却要损耗样品,多数情况是不可行的。

红外反射光谱技术是红外辐射经宝石表面反射到探测器来进行测量的,可以快速、准确、无损伤地得到与宝石矿物的基频振动有关的长波部分信息(郭立鹤等,2006)。由于反射光谱信号很弱,反射光谱和熟悉的粉末 KBr 压片测量的透过光谱有差别,造成读谱困难,在较长时间未引起重视。Martin 等(1989)测量了 60 多种宝石的红外反射光谱,认为反射光谱技术可以快速确定宝石种属,有时还可以确定天然或合成宝石。笔者收集测试了 3 600 多个宝石样品(包括天然宝石、天然玉石、有机宝石、合成宝石、人造宝石、优化处理宝玉石及相关材料)的红外反射光谱,在 2001 年召开的二十一世纪首届全国珠宝学术会议上介绍了红外反射光谱在宝石鉴定上的应用<sup>①</sup>。近两年来,有越来越多的人用红外反射光谱技术来鉴定和研究宝石(张丽,2004;元利剑等,2005),其最大优势是提供  $2\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$  区间的长波信息,是确定宝石种属的得力手段。但是,反射光谱经常不能确保得到大于  $2\,000\text{ cm}^{-1}$  的信息。而将透过测量与反射测量二者结合起来,可以获得完整的宝石红外光谱信息,大大扩展了红外光谱技术在宝石鉴定和宝石学研究中的应用范围。笔者于 2003 年研发出宝石红外光谱鉴定系统并进入市场,其数据库中现已收集了 318 个光谱(包括 106 种宝石、81 种矿物),实现了宝石种属鉴定及 A、B 货翡翠鉴定程序化。本文介绍宝石的红外反射光谱特点和宝石红外光谱鉴定系统。

## 1 样品、仪器设备及测量方法

除少数样品取样做了粉末 KBr 压片测量外,所有透过光谱及反射光谱均直接在样品上原位测量,不需要制样。

宝石的红外光谱测量对光谱仪的技术指标没有太高的要求,由于宝石的红外反射光谱信号很弱,仪器的信噪比越高,得到的信息越丰富。但反射光谱测量需要配备反射附件(配置有红外显微镜的用户可以不添置)。本文所测光谱主要是在德国 BRUKER 光谱仪器公司生产的红外光谱仪上进行测试的,多数反射光谱使用瑞丽光谱仪器公司生产的

曲面镜反射附件,少数小颗粒样品使用红外显微镜测量。还选出少量样品在美国 THERMO 科技仪器有限公司、日本 SHIMADZU 国际贸易有限公司和北京瑞丽光谱仪器公司的不同型号红外光谱仪上进行了对比测试,结果表明,同一样品在不同厂家的任何一种红外光谱仪上测量获得的红外光谱相同。

所有宝石样品(金刚石除外)都要进行反射光谱测量,金刚石及含水的、可能经有机物充填处理的、可能有多种生成环境(如水热法、提拉法、焰熔法)的宝石样品还要测量透过光谱。测量条件为:分辨率  $4\text{ cm}^{-1}$ ,扫描时间 32 次(约 0.5 min),常温,相对湿度低于 70%。测量范围:多数样品是  $7\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ ,有的样品是  $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ ,个别样品用红外显微镜测量,光谱范围是  $7\,000\sim 650\text{ cm}^{-1}$ 。

## 2 宝石的红外光谱的特征

实验结果显示,采用透过方式测得宝石的红外光谱可用信息为大于  $2\,000\text{ cm}^{-1}$  的短波段,如图 1 左下是聚合物充填处理的翡翠手镯的红外透过光谱。透过谱中位于  $3\,543\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰是组成翡翠的矿物中所含  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}-\text{H}$  基团的基频伸缩振动,位于  $3\,029$ 、 $2\,964$ 、 $2\,929$ 、 $2\,871\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰是聚合物的  $\text{C}-\text{H}$  基团基频伸缩振动。利用反射方式测得的主要是小于  $2\,000\text{ cm}^{-1}$  的长波段光谱信息,它涉及组成宝石矿物结构基团的基频伸缩振动及弯曲振动信息。二者结合起来就可以得到宝石的完整红外光谱。图 1 左上是一翡翠手镯的红外反射光谱,位于  $1\,171$ 、 $1\,078$ 、 $945$ 、 $854$ 、 $588$ 、 $536$ 、 $474\text{ cm}^{-1}$  的吸收谱带是组成翡翠手镯的主要矿物硬玉的  $\text{Si}(\text{Al})-\text{O}$  基团的基频伸缩振动和弯曲振动。图 1 右上是聚合物充填处理的石英岩手镯的红外透过光谱,单从  $2\,964$ 、 $2\,929$ 、 $2\,873\text{ cm}^{-1}$  的吸收光谱可能误判为充填处理的翡翠,图 1 右下是同一石英岩手镯的红外反射光谱,证明其是石英岩而不是翡翠。

### 2.1 宝石的红外透过光谱特征

前已述及,宝石的透过光谱能得到大于  $2\,000\text{ cm}^{-1}$  的由宝石中所含的  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}-\text{H}$ 、 $\text{C}-\text{H}$  基团的基频伸缩振动及宝石主体结构基团的合频、倍频振动引起的丰富的短波红外光谱信息。虽然透过光谱不适合用来鉴定宝石种属,却是近 10 多年研发出来

① 郭立鹤,罗红宇. 2001. 应用反射光谱技术鉴定宝石. 二十一世纪首届全国珠宝学术会议论文集. 49~51.



射的穿透能力比长波红外辐射的强,当按照透射纪录方式设置测量条件来测量反射光谱时,在短波区间(通常 $>2000\text{ cm}^{-1}$ )得到的是透过光谱形式,吸收峰是向下的,长波区间得到的是吸收光谱形式,即吸收峰是向上的。反之,在按照吸收方式设置测量条件测量反射光谱时,在短波区间得到的是吸收光谱形式,光谱峰是向上的;在长波区间得到的是透过光谱形式,即光谱峰是向下的。这点特别重要,否则不能正确读出吸收谱带位置,无法进行鉴定。从透过光谱形式转成吸收光谱形式的转折点大致在 $2000\text{ cm}^{-1}$ 左右。图 4 是蓝宝石的红外反射光谱,其晶格缺陷中的微量 OH 的伸缩振动谱带位于 $3309\text{ cm}^{-1}$ ,吸收峰是向下的,而 Al—O 键的基频振动吸收峰( $733, 617, 463\text{ cm}^{-1}$ )则是向上的。

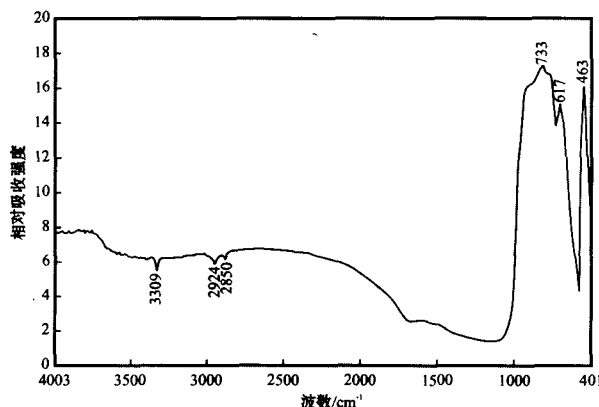


图 4 蓝宝石的红外反射光谱

Fig. 4 IR reflectance spectrum of sapphire

宝石的反射光谱还要受到折光率的影响,在强吸收带附近产生折光率异常色散,光谱发生畸变,使得反射光谱的谱带位置与吸收光谱有差异,这在少数有机宝石的红外反射光谱中表现特别明显。如图 5 下是琥珀的红外反射光谱,读谱困难,需要做 K-K 转换(Kramers-Kronig Transformation)将其转成熟悉的光谱形式,再进行鉴定,图 5 上是 K-K 转换后的反射光谱(光谱中的 C—H 键是向上的)。

多数无机宝石的反射光谱的畸变程度不明显,同人们熟悉的粉末 KBr 压片光谱无大差异,不作 K-K 转换就可以识别。还要指出的是,对反射光谱进行 K-K 转换是有条件的,只有均匀的纯物质的反射光谱才适合进行 K-K 转换,混合物、薄膜、粉末状样品的反射光谱则不适合做。多数玉石是由分布不一定均匀的几种矿物组成,其反射光谱不适合进行 K-K 转换。

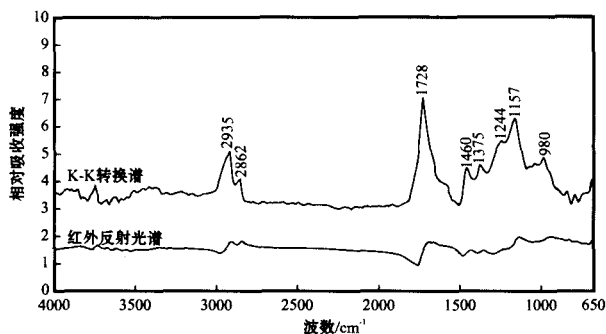


图 5 琥珀的红外反射光谱及 K-K 转换谱

Fig. 5 IR reflectance spectra of amber before and after K-K transformation

目前还没有一家光谱仪器公司给出合理表示红外反射光谱图的纵坐标物理意义的方法,笔者建议使用“相对吸收强度”来表示。

宝石的红外反射光谱与它的粉末 KBr 压片光谱可能会有差别。因为无损测量宝石时,测量对象多是一个单晶体,获得的是某一特定方位的反射光谱信息,而粉末光谱则是全方位测量,获得的是所有方位的平均光谱信息,二者在谱带数量及相对强度上会有差别。另外,对称程度低的宝石单矿物的光谱同粉末光谱的差别相对较大,对称程度高的单晶体或由多晶体组成的宝石,其反射光谱与它的粉末光谱差别要小一些。

### 2.3 红外反射光谱技术在宝石鉴定方面的应用

红外反射光谱主要提供小于 $2000\text{ cm}^{-1}$ 范围的光谱信息,是组成宝石的矿物骨架结构的基频振动及晶格振动谱带,可以用来快速、无损伤地确定宝石的种属。图 6 是玛瑙、水晶、软玉、翡翠、海蓝宝石、橄榄石、电气石和蓝宝石在 $2000\sim400\text{ cm}^{-1}$ 区间的红外反射光谱。从以上光谱可以见到,宝石的晶体结构及化学组成不同,它们的红外反射光谱完全不一样。由同一种物质组成的不同宝石,它们的红外反射光谱是相同的,如天然或合成的红(蓝)宝石、星光红(蓝)宝石、红(蓝)宝石猫眼,其组成矿物都是刚玉,很难用基频红外光谱将其区分开。但是,玛瑙和水晶都由 $\text{SiO}_2$ 组成,它们有基本相同的红外反射光谱,由于组成水晶的 $\text{SiO}_2$ 结晶程度高,组成玛瑙的 $\text{SiO}_2$ 结晶程度低,在它们的基频红外反射光谱中还是显示出一些细节差异,如水晶在 $800\sim400\text{ cm}^{-1}$ 范围的吸收谱带分裂程度高,玛瑙在该范围的吸收谱带分裂程度明显低一些。

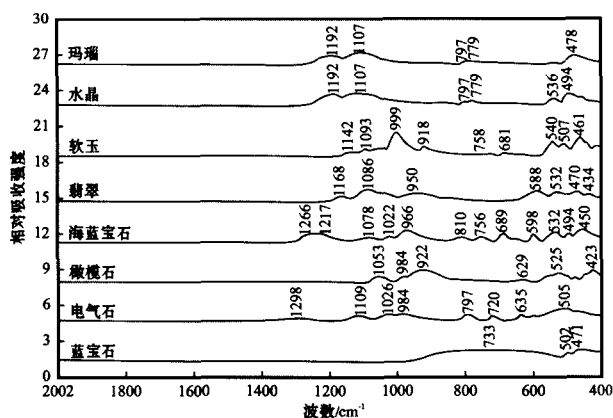


图6 玛瑙、水晶、软玉、翡翠、海蓝宝石、橄榄石、电气石、蓝宝石的红外反射光谱

Fig. 6 IR reflectance spectra of agate, crystal, nephrite, jadeite, aquamarine, olivine, tourmaline and sapphire

有时也能够用反射方式测量得到大于  $2\,000\text{ cm}^{-1}$  区间的光谱信息。反射光谱测量通常是在反射光的入射角大于全反射的临界角的情况下进行的,除了部分入射光被物质表面反射到检测器外,还有部分红外光透过样品表面,再被物质内部反射回来,进入到检测器。实际测到的并不是纯的反射谱,还叠加有透过谱,而短波护卫辐射的穿透能力强。如图7中翡翠位于  $1\,200\sim 400\text{ cm}^{-1}$  的谱带是硬玉的基频振动谱带。正常翡翠表面常有的石蜡的 C—H 伸缩振动吸收谱带位于  $2\,850, 2\,920, 2\,960\text{ cm}^{-1}$ , 聚合物充填翡翠中环氧树脂的 C—H 伸缩振动谱带位于  $3\,056, 2\,973, 2\,876\text{ cm}^{-1}$ 。锆石的基频振动谱带位于  $1\,080, 972, 619, 438\text{ cm}^{-1}$ , 在  $7\,000\sim 2\,000\text{ cm}^{-1}$  区间的光谱表明,其结构中还有  $\text{H}_2\text{O}, \text{OH}$ , 它们

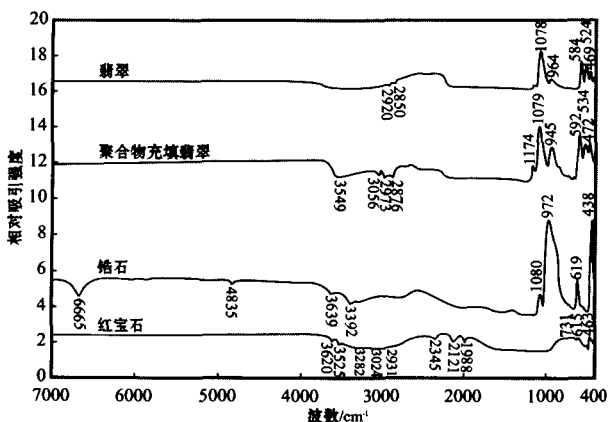


图7 翡翠、聚合物充填翡翠、锆石、红宝石的红外反射光谱  
Fig. 7 IR reflectance spectra of jadeite, polymer impregnated jadeite, zircon and ruby

的基频伸缩振动谱带和倍频/合频谱带包括  $6\,665, 4\,835, 3\,639, 3\,392\text{ cm}^{-1}$ 。天然红宝石的基频振动谱带位于  $731, 615, 463\text{ cm}^{-1}$ , 位于  $4\,000\sim 1\,990\text{ cm}^{-1}$  区间的谱带是其所含云母 ( $3\,620\text{ cm}^{-1}$ )、三水铝石 ( $3\,525\text{ cm}^{-1}$ )、一水软铝石 ( $3\,282\text{ cm}^{-1}$ )、硬水铝石 ( $3\,024, 2\,931, 2\,121, 1\,988\text{ cm}^{-1}$ ) 等杂质的 O—H 伸缩振动谱带。

但是,宝石在大于  $2\,000\text{ cm}^{-1}$  波段的光谱信息最好用透过光谱测量来获取。宝石鉴定的国家标准中规定,鉴别翡翠中是否有聚合物充填,要使用红外透过光谱来鉴别。

## 2.4 红外反射光谱技术在宝石学研究中的应用

红外反射光谱为更深入的宝石学研究提供了方法途径。实验结果表明,在宝石晶体的不同方向测得的反射光谱是有差异的。图8是在同一金绿宝石的(001)、(100)、(111)晶面测量的红外反射光谱,3个晶面的光谱差异提供了金绿宝石晶体中 Be—O 键及 Al—O 键结构方位的详细且直观的信息,使用透过测量方法是难以得到的。如果对含水宝石同时用反射方式与透过方式来测量,有可能得到水在晶体中的确切结构位置,有关测量需要使用红外偏振附件。

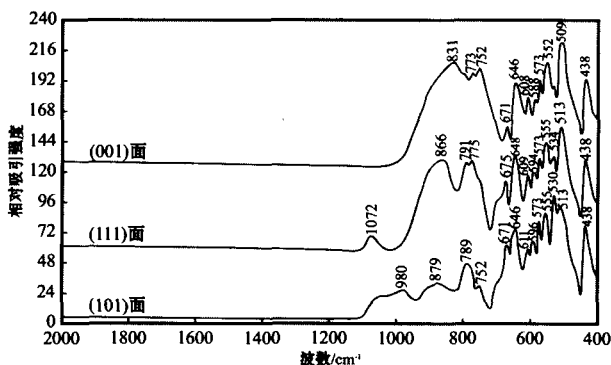


图8 金绿宝石不同晶面的红外反射光谱

Fig. 8 IR reflectance spectra of chrysoberyls taken on some planes

## 3 宝石红外反射光谱鉴定系统

单从透过方式测量得到的宝石光谱信息是非常有限的,而反射方式测量可以得到所有宝石的基频振动光谱信息,大大丰富了宝石光谱的信息量,但红外反射光谱往往得不到宝石中水、C—H 键的光谱信息。将红外反射光谱方法与透过光谱方法结合起来,就可以得到完整的红外光谱信息,使建立宝石红外光谱数据库成为可能。目前,国内未见到其他专

门用于宝石的红外光谱数据库和鉴定系统。常见的红外光谱数据库是以粉末 KBr 压片透过光谱为基础建立的,不适合无损伤宝石的鉴定。笔者研发的一

个由宝石红外光谱数据库和系统管理、检索程序组成的宝石红外光谱鉴定系统已经完成,图 9 给出了该库中 86 种宝石的红外反射光谱,现介绍如下:

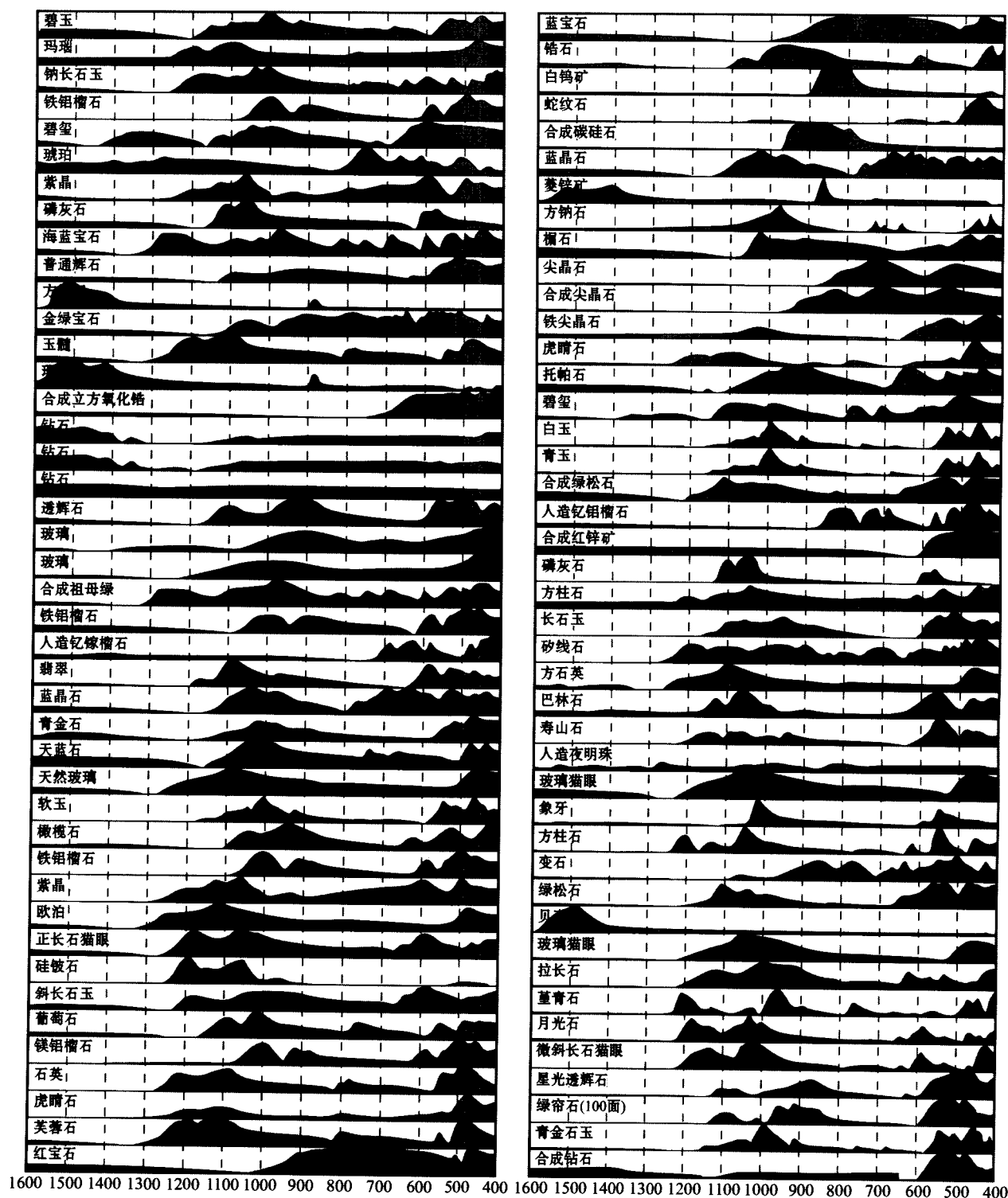


图 9 86 种宝石的红外反射光谱

Fig. 9 IR reflectance spectra of eighty-six kinds of gems

### 3.1 宝石红外光谱数据库

以 SADTLER 公司编制的商业矿物红外光谱数据库为例, 现有的矿物红外光谱库的光谱数据是按粉末 KBr 压片法测量收集的, 收录了英文矿物名及化学式。笔者的宝石红外光谱数据库的光谱数据是由无损测量的反射光谱、透过光谱和少量粉末 KBr 压片透过谱组成, 现有 318 个红外光谱数据, 包括 106 种宝石(天然宝石、天然玉石、有机宝石、合成宝石、人造宝石、优化处理宝石、相关材料), 还收录了宝石的中/英文名称、化学式、晶系、矿物组成、颜色、比重、硬度、分类代码等数据, 以便检索。宝石名称按国家标准 GB/T16552—2003 规定执行, 国家标准未给出的宝石名称按新矿物及矿物命名委员会审定的名称和命名原则执行, 宝石的化学式按新矿物及矿物命名委员会审定的执行。参照国家标准附录的分类方法确定分类代码为: A1—天然宝石; A2—天然玉石; A3—天然有机宝石; A4—合成宝石; A5—人造宝石; B1—优化处理珠宝玉石; B2—相关的优化处理材料。尚未列入国家标准规范性附录中的珠宝玉石名称, 在分类代码末位加 b, 如白钨矿的分类代码是 A1b。

### 3.2 宝石红外光谱检索程序

目前各光谱仪器公司提供的光谱检索程序都采用全光谱检索方式, 要求采集光谱数据的数据记录格式(如透过方式还是吸收方式、分辨率)必需同数据库的格式一致, 否则不能检索。这种方法检索内容单一, 只能确定矿物种属。最近, 笔者研发的矿物红外光谱数据库设计了新的检索方式, 除用全谱检索外, 还可以用峰位检索, 以及矿物名称、化学式等检索, 检索内容也增加了矿物学应用程序, 如钾长石结构有序度计算、金刚石指示矿物石榴石、尖晶石判断等。有关内容将另文介绍。

本宝石红外光谱检索程序设计了吸收谱带峰位及全谱两种检索方式, 还可以通过宝石的中/英文名称、颜色、比重、硬度提取数据库光谱进行对比。使用吸收峰位检索方式时, 不用考虑光谱数据记录格式; 如果使用全谱检索方式, 就要考虑数据记录格式的问题。检索内容以鉴别宝石的矿物种属为主, 还特别设计了 A、B 货翡翠鉴别程序。今后将根据国家标准要求, 不断增加新的特殊鉴定程序。

宝石红外光谱鉴定系统的光谱数据格式同各红外光谱仪厂家的特殊光谱数据格式有较好的兼容性, 已于 2003 年进入市场。

## 4 结 论

(1) 红外反射光谱是一种快速、简便、准确、直观且不损伤样品的测试技术。

(2) 用反射附件测量宝石的红外光谱时, 当测试条件设置为透过模式时, 在  $2\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$  区间获得的是吸收光谱形式; 当测试条件设置为吸收模式时,  $2\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$  区间得到的是透过光谱形式。

(3) 在进行宝石的红外光谱分析中, 多数情况是测试单晶体的一定结晶方位的光谱, 同常规 KBr 粉末压片法得到的谱图有不同程度的差异。等轴晶系的宝石及以多晶体形式存在的玉石类的红外光谱同 KBr 粉末压片法得到的谱图的差异较小。非等轴晶系的宝石不同方位的反射光谱、有类质同像替代的宝石的反射光谱会有较大差异, 但规律是有的。

(4) 不同宝石属于不同的矿物种, 具有不同的红外反射光谱图, 可据此来鉴别它们, 并进行深入的宝石学研究。在常规的宝石鉴定中, 因种种原因无法测到它们的折射率、比重等物理数据时, 测量其红外反射光谱就具有相当重要意义。

(5) 宝石红外光谱检索系统是在红外反射光谱方法和透过方法相结合的基础上实现的, 为宝石鉴定及宝石学研究提供了程序化的方式。

## References

- Fritsch E and Scarratt K. 1992. Natural-color nonconductive gray-to-blue diamonds [J]. *Gems and Gemology*, 28(1): 35~42.
- Fritsch E, Ten Wus S T, Moses T, *et al.* 1992. Identification of bleached and polymer-impregnated jadeite [J]. *Gems and Gemology*, 28(3): 176~187.
- Guo Lihe and Han Jingyi. 2006. The mineralogical applications of IR reflectance spectrometry[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 250~256 (in Chinese with English abstract).
- Johnson M L. 2000. Technological development in the 1990s. their impact on gemology[J]. *Gems and Gemology*, 36(4): 380~396.
- Kiefert L, Hanni H A, Chalain J P, *et al.* 1999. Identification of filler substances in emeralds by infrared and Raman spectroscopy [J]. *J. of Gemology*, 26(8): 501~520.
- Liu Hongxia, Qi Lijian, Zeng Jiliang, *et al.* 2001. Research on gemological characters of hydrothermal synthetic yellow sapphire from Guilin [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 3(1): 7~11 (in Chinese).
- Martin E, Merigoux H and Zecchini P. 1989. Reflectance infrared spectroscopy in gemology [J]. *Gems and Gemology*, winter: 226~231.

- Owens P A. 1999. Infrared spectroscopy as a discriminant between natural and manufactured glass [J]. *Gems and Gemology*, 35(3): 152.
- Peretti A, Schmetzer K, Bernhardt H J, *et al.* 1995. Rub from Mong Hsu[J]. *Gems and Gemology*, 31(1): 2~26.
- Qi Lijian, Yuan Xinqiang and Cao Shumin. 2005. Representation and application infrared reflection specttr of gems [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 7(4):21~25 (in Chinese).
- Qi Lijian, Yuan Xinqiang, Tian Lianguang, *et al.* 2001. Evolution and colouration of lattice defects in diamonds at high pressure and high temperature [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 3(3): 1~7 (in Chinese).
- Schmetzer K and Kiefert. 1990. Water in beryl—A contribution to the separability of natural and synthetic emeralds by infrared spectroscopy [J]. *Journal of Gemology*, 22(4): 215~223.
- Shigley J E, Fritsch E, Reinitz I, *et al.* 1995. A chart for the separation of natural and synthetic diamonda [J]. *Gems and Gemology*, 31(4): 256~264.
- Smith C P. 1995. A contribution to understanding the infrared spectra of rubies from Mong Hsu, Myanmar [J]. *Journal of Gemology*, 24(5): 321~335.
- Weldon R. 1999. Just your type [J]. *Professional Jeweler*, 2(8): 30~

32.

- Zhang Li. 2003. Study on gemological characters of flux-grown synthetic spinel [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 3(3): 18~21 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 郭立鹤,韩景仪. 2006. 红外反射光谱方法的矿物学应用[J]. *岩石矿物学杂志*, 25(3): 250~256.
- 郭立鹤. 1994. 红外光谱的地学应用[A]. 吴瑾光等. 近代傅立叶变换红外光谱技术及应用(下卷)[C]. 北京:科学技术文献出版社, 129~155.
- 刘红霞,元利剑,曾骥良,等. 2001. 桂林水热法合成黄色蓝宝石的宝石学特征研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 3(1):7~11.
- 元利剑,袁心强,曹姝旻. 2005. 宝石的红外反射光谱表征及其应用[J]. *宝石和宝石学杂志*, 7(3):21~25.
- 元利剑,袁心强,田亮光,等. 2001. 高压高温处理条件下钻石中晶格缺陷的演化与呈色[J]. *宝石和宝石学杂志*, 3(3):1~7.
- 张丽. 2004. 助熔剂法合成尖晶石的宝石学特征研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 6(2):18~21.