# 澳大利亞閃電嶺歐泊(蛋白石) 的寶石學特徵研究 The Gemmological Characteristics of **Opal from Lightning Ridge, Australia** 楊佳睿 YANG Jiarui 何雪梅 HE Xuemei 惲成林 YUN Chenglin 冶永斌 YE Yongbin 中國地質大學(北京)珠寶學院,北京,100083

School of Gemmology, China University of Geosciences (Beijing) Beijing 100083

網址:https://sg.cugb.edu.cn

*電郵:18610740921@163.com* hexuemei3127@126.com

Abstract: Taking opal in Lightning Ridge, Australia as its research object, this paper analyses the gemmological characteristics of samples through conventional gemmological tests, observation under polarising microscope, infrared spectrum test, UV-Vis spectrum, X-ray fluorescence spectrum analysis, X-ray powder diffraction analysis and scanning electron microscope observation. The results show the varieties of Australian Lightning Ridge opal to be white opal, black opal and crystal opal and the structures to be dense block structure or cryptocrystalline structure. The crystal opal is transparent to semitransparent, while the black opal and white opal are translucent. The spot measured refractive index is 1.43-1.46, and some samples showed bluish purple fluorescence under ultraviolet fluorescence. The major mineral component is opal, and the secondary mineral component is guartz. The infrared spectrum shows the vibration peak of typical opal. UV-VIS spectra show that some black opals have absorption at 580nm-750nm, which is matched with the absorption band of Fe<sup>3+</sup>. XRF examination reveals that the dark colour concentration of the black opals of Lightning Ridge, Australia is caused by Ti. Scanning electron microscopy showed that crystal opal contained fibrous palygorskite symbiotic with opal.

Key Words: Infrared spectrum: Ultraviolet visible spectrum; X-ray fluorescence spectrum analysis; X-ray powder diffraction analysis; scanning electron microscope

摘要:本文以澳大利亞閃電嶺的歐泊為研 究對象,通過常規寶石學測試、偏光顯微 鏡下觀察、紅外光譜測試、紫外--可見光 光譜以及X射線熒光光譜分析、X射線粉 晶衍射分析、掃描電鏡觀察,對樣品的寶 石學特徵進行分析。結果表明,澳大利亞 閃電嶺歐泊的種類有白歐泊,黑歐泊,水





HE Xuemei





惲成林 YUN Chenglin

YE Yonabin

晶歐泊,緻密塊狀構造,隱晶質結構,水 晶歐泊呈透明到半透明,黑歐泊、白歐泊 為半透明,點測折射率1.43-1.46,紫外熒 光下可有藍紫色熒光。其主要礦物為蛋白 石,次要礦物有石英等。紅外光譜顯示典 型蛋白石的振動峯。紫外—可見光光譜顯 示部分黑歐泊樣品在580nm-750nm處具有 吸收,匹配為Fe<sup>3+</sup>的吸收帶,XRF分析發 現澳大利亞閃電嶺歐泊的黑深色濃度受Ti 元素影響。掃描電鏡觀察發現水晶歐泊含 有與蛋白石共生的纖維狀坡縷石。

關鍵詞:紅外光譜;紫外—可見光光譜; X射線熒光光譜分析;X射線粉晶衍射分 析;掃描電鏡中圖

歐泊,也稱澳寶、蛋白石,是多水二氧化 **矽寶石**,具有獨特的變彩效應,光澤耀眼 燦爛,顏色五彩繽紛<sup>[1]</sup>。澳大利亞優質 歐泊的重要產地之一為閃電嶺(Lightning Ridge)礦區。本課題主要針對澳大利亞閃 電嶺歐泊的常規寶石學特徵、礦物組成、 結構構造及微結構特徵等進行研究。

# 1. 測試樣品和方法

## 1.1 測試樣品描述

本文研究的18塊澳大利亞閃電嶺歐泊樣品 原料分為黑歐泊編號h-1~h-9,水晶歐泊編 號為sj-1~sj-3,白歐泊編號為b-1~b-6,如下 圖1-圖3所示。樣品外觀呈緻密塊狀結構, 塊度1-5cm,形狀不規則,一些樣品具有 水平層理結構,肉眼可見變彩效應,變彩 多呈鳞片狀,圍岩部分為淺褐色,呈粒狀 結構,有時局部可見條帶狀構造分佈。點 測折射率為1.43-1.46,紫外熒光下可有藍 紫色熒光,相對密度為1.89-2.14。樣品的 具體特徵如表1所示。



## 表1 澳大利亞閃電嶺歐泊常規寶石學特徵

Conventional gemmological characteristics of opal from Lightning Ridge, Australia

編號	體色	光澤	透明度	是否有圍岩	變彩
h-1	黑色	玻璃光澤	不透明	否	藍綠色,不明顯
<b>h-2</b>	黑色	蠟狀光澤	不透明	是	無
h-3	黑色	玻璃光澤	不透明	是	無
<b>h-4</b>	黑色	玻璃光澤	不透明	是	無
h-5	黑色	蠟狀光澤	不透明	是	無
<b>h-6</b>	黑色	蠟狀光澤	不透明	是	無
h-7	黑色	玻璃光澤	不透明	否	綠色,不明顯
<b>h-8</b>	白色	玻璃光澤	不透明	否	無
h-9	黑色	蠟狀光澤	半透明	否	無
sj-1	白色	蠟狀光澤	透明	否	紫色光斑,變彩明顯
sj-2	白色	蠟狀光澤	半透明	是	紫色光斑,變彩明顯
sj-3	白色	玻璃光澤	透明	是	藍色變彩,不明顯
b-1	白色	蠟狀光澤	半透明	否	無
b-2	白色	蠟狀光澤	亞透明	否	無
b-3	白色	玻璃光澤	不透明	否	紅色變彩,不明顯
<b>b-4</b>	白色	玻璃光澤	不透明	是	藍色光斑,變彩明顯
b-5	灰色	蠟狀光澤	不透明	否	無
b-6	灰色	蠟狀光澤	不透明	否	無



**圖4** a: 樣品sj-2歐泊與為圍岩交界處; b: 樣品b-5深色部分為圍岩; c: 樣品h-8彩色顆粒及條帶 a: Sample sj-2 opal is at the junction of surrounding rock; b: The dark part of sample b-5 is the surrounding rock; c: Sample h-8 colour particles and strips.

### 1.2 樣品製備

將樣品h-8,h-9,sj-2,b-1,b-5五塊樣品 製成薄片,編號為H-8,H-9,SJ-2,B-1,B-5。

## 1.3 測試方法

在中國地質大學(北京)珠寶學院寶石實 驗室,利用折射儀、偏光鏡、紫外熒光燈 觀察澳大利亞閃電嶺歐泊常規寶石學特 徵;使用HR-Evolution纖維拉曼光譜儀, 進行拉曼光譜測試,激發光源波長532nm 分辨率1cm<sup>-1</sup>,激光功率30~40mW,掃描 3次,單次積分時間10s;使用BURUKER TENSOR27型傅裡葉變換紅外光譜儀進 行測試,譜區範圍:2000~400cm<sup>-1</sup>,掃描 次數30次,分辨率4cm<sup>-1</sup>;使用UV-3600系 列紫外—可見分光光度計進行測試,實驗 測試波長範圍200~800nm,中速掃描模 式,採樣間隔1.0nm,採用反射法測量樣 品吸收率;使用EDX-7000能量色散X射線 **熒光光譜儀進行分析測定,選取最小測試** 範圍1mm。掃描電鏡為日本日立H-8100 場發射掃描電鏡,電壓為15-20kv,XRD 所用儀器為日本理學Smartlab,X光源為 Cuk a1, 電壓為45Kv, 電流為200mA, 石墨單色管,掃描方式為高精度的步進 掃描,掃描範圍為2 $\theta$ =3°~120°,步長 為0.02°, 掃描速度為4°/min, 狹縫為 DS=SS=1/6°RS=0.15mm,測試溫度為 15℃,濕度為22%。

## 2 測試結果與分析

#### 2.1 岩相學分析

澳大利亞閃電嶺歐泊為隱晶質集合體,將

樣品製成薄片在偏光顯微鏡下進行觀察, 呈淺褐黃色,透明,變彩部分顏色較深, 礦片中圍岩部分糙面清晰,可見黑色不透 明礦物呈片狀或粒狀分佈,單偏光下可見 明顯漸變層理,可能由非晶質SiO2向隱晶 質轉化而成。礦片糙面清晰,邊緣明顯, 負高突起,局部被泥質浸染。母岩呈深褐 色,幾乎不透明,無定形結構,局部可見非 晶質的SiO2充填,正交偏光鏡下該部分全 部消光。

正交偏光下局部可見橙黃色,黃綠色類似 變彩顏色的顆粒及條帶,可見多為灰白干 涉色的雛晶,可能是SiO2由非晶態向晶態 轉化所致,該部分成分可能是隱晶質的玉 髓,其餘大部分全消光。

## 2.2 紅外光譜分析

為探究樣品成分特徵,對其進行了紅外光 譜測試,測試結果見下圖:





画o 你面n-8紀77几亩画 Infrared spectrum of sample h-8

樣品h-1在1111cm<sup>-1</sup>可見特徵吸收峯,由 Si-O-Si反對稱伸縮振動導致;在779cm<sup>-1</sup>處 也可見特徵吸收峯是Si-O-Si鍵的對稱伸縮 振動所致;在470cm<sup>-1</sup>處可見特徵吸收峯, 是Si-O鍵彎曲振動所致。

表2 澳大利亞閃電嶺歐泊紅外吸收光峯歸屬

Assignment of Infrared Absorption Peaks of Lightning Ridge Opal in Australia

峯位	譜帶歸屬
1100cm <sup>-1</sup>	1100-1150cm <sup>-1</sup> 範圍內, 屬Si-O-Si反對稱伸縮振動
770cm <sup>-1</sup>	770-800cm <sup>-1</sup> 範圍內, 屬Si-O-Si鍵的對稱伸縮振動
470cm <sup>-1</sup>	470-490cm <sup>-1</sup> 範圍內, 屬Si-O鍵彎曲振動
1270cm <sup>-1</sup>	1270cm <sup>-1</sup> 及1200cm <sup>-1</sup> 附近, 屬Si-O-Si反對稱伸縮振動

測試結果顯示,樣品在1100-1150cm<sup>-1</sup>、 770-800cm<sup>-1</sup>、470-490cm<sup>-1</sup>處有三處吸 收峯,樣品h-8較為特殊,在1270cm<sup>-1</sup>及 1200cm<sup>-1</sup>附近也存在吸收峯。查找文獻發 現,1100-1150cm<sup>-1</sup>處吸收峯由Si-O-Si反對 稱伸縮振動導致;800cm<sup>-1</sup>附近的吸收峯是 Si-O-Si鍵的對稱伸縮振動所致;470cm<sup>-1</sup>附 近的峯為Si-O鍵彎曲振動所致;1270cm<sup>-1</sup> 及1200cm<sup>-1</sup>處的特殊峯也由Si-O-Si反對稱 伸縮振動導致<sup>[6]</sup>,見表2。SiO2結晶程度 越高兩峯分離越明顯,說明樣本仍存在晶 質石英。

#### 2.3 紫外—可見光光譜分析

彩色寶石可以由其內部含有的金屬元素致 色,如Mn元素致紅色調、Cr元素致綠色 調、Fe元素致黃色調、Cu元素致藍色調 等。為探尋澳大利亞閃電嶺歐泊的顏色成 因,本文針對18塊樣品均各取一個測試 點進行紫外一可見光光譜分析,測試點 大部分選擇變彩位置,選取其中具有特 徵性的進行分析,測試結果如下,所測 試的樣品的吸收譜帶基本一致,在414、 472、554、602、644、668nm附近存在吸 收峯,其中在h-1、h-2、h-8、sj-1、b-1、 b-2、b-3樣品有856nm吸收峯,h-3、h-4、 h-8樣品均有658nm吸收峯、在b-3、b-4樣 品有414nm附近存在吸收峯,下圖為h-1的 紫外光譜圖。

紫外譜線中吸收峯的峯位與致色離子有 關,強弱則與致色離子含量的多少有關, 因此認為所選樣品的主要致色離子相同, 但含量略有差別。410-700nm和856nm附 近出現的吸收峯與Fe<sup>3+</sup>有關。



圖7 樣品h-1的紫外─可見光光譜圖 Ultraviolet visible spectrum of sample h-1



圖8 樣品h-2的紫外—可見光光譜圖 Ultraviolet visible spectrum of sample h-2

## 2.4 X射線熒光光譜儀(XRF)分析

本文採用XRF技術分別對塊樣品進行了測 試分析,較準確的反映出歐泊樣品中各 主要元素和微量元素(以氧化物計)的相 對質量分數,共選取了8個測試點,得到 1mm內元素的平均質量分數(表)根據測 試結果,結合前人研究,本文分析認為, 澳大利亞閃電嶺歐泊的成分主要為SiO<sub>2</sub>, 含量在97%以上,見下表3,其次,除了 Si、O兩種主要元素外,澳大利亞閃電嶺 歐泊還含有微量的S、Ca、Fe、K、Ti、 Cu等元素。可見黑歐泊樣品中均含有微 量Ti,而水晶歐泊中不含任何Ti,說明澳 大利亞閃電嶺歐泊的深色濃度受Ti元素影響。

## 2.5 X射線粉晶衍射(XRD)分析

為了探究澳大利亞閃電嶺歐泊物相組成及 形態,本文針對H-8、H-9、SJ-2、B-1、 B-5五塊薄片進行X射線粉末衍射圖譜分 析,譜線表現為以22°(2*θ*)為中心的低 而寬闊的峯,證明該歐泊是非晶態的,同 時出現了d=4.16、d=3.97、d=4.47的吸收 峯,説明該樣品中含有α-磷石英,同時也 説明該歐泊是晶質集合體。通過上述XRD 測試,本文分析認為,根據晶體生長規 律,歐泊是由非晶質→晶質集合體之間連 續漸變的<sup>[10]</sup>。

組成	h-1	h-4	h-6	si-1	si-2	si-2	h-1-4	h-5-4
MIL/M			園岩	<u></u>	<u> </u>	園岩		
SiO <sub>2</sub>	98.869	97.703	87.704	98.043	98.845	89.272	77.896	98.727
SO <sub>3</sub>	0.456	0.560	0.790	1.062	0.267	0.641	-	-
CaO	0.210	0.511	0.384	0.377	0.427	0.483	0.479	0.532
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.105	0.202	-	0.088	0.152	0.549	0.906	0.245
K <sub>2</sub> O	0.208	0.741	-	0.288	0.275	0.479	0.741	0.449
TiO <sub>2</sub>	0.094	0.206	0.785	-	-	0.377	1.048	-
ZrO <sub>2</sub>	0.029	0.023	0.048	-	-	0.027	0.027	0.010
CuO	0.015	0.030	0.022	0.019	0.011	0.023	0.014	0.012
SrO	0.006	0.015	0.006	0.011	0.008	0.007	0.006	0.014
ZnO	0.005	0.004	0.006	-	-	0.004	0.011	0.011
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.003	0.002	-	-	-	-	-	-
MnO	-	-	0.019	-	-	0.008	-	-
PbO	-	-	-	-	-	-	-	-
Rb <sub>2</sub> O	-	0.003	-	-	-	0.002	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	9.088	-	-	8.112	18.838	-
$V_2O_5$	-	-	0.029	-	-	0.016	0.034	-
Ag <sub>2</sub> O	-	-	-	-	0.016	-	-	-
RuO <sub>2</sub>	-	-	-	0.112	-	-	-	-
總和	100	100	98.881	100	100.001	100	100	100

註:-代表低於檢出限

表3 樣品的元素組成及質量分數

The composition elements and mass fraction of the samples



歐泊由無數二氧化矽球體在三維空間上緊

密堆疊而成,絢麗的變彩歐泊和普通蛋白

石的差別主要體現在它們的內部結構。若

歐泊內部的球體大小均一併且整齊堆積,

就會產生漂亮的變彩效應,變彩效應越強

**圖9** 樣品h-6的X射線粉晶衍射譜圖 XRD pattern of sample h-6

2.6 掃描電子顯微鏡分析



圖10 樣品h-9的X射線粉晶衍射譜圖 XRD pattern of sample h-9

### 烈,歐泊的品質以及價值就越高。為了 研究澳大利亞閃電嶺樣品中SiO2小球的排 列方式,本文針對薄片H-2、H-8、H-9、 SJ-2、B-4在掃描電子顯微鏡下進行觀察, 測試樣品選用新鮮斷面,並進行噴鉑預處 理。



圖11 樣品掃描電鏡圖 Electron microscope scanning of samples

樣品h-9放大1500倍,顆粒邊緣無定形,不 規則團聚成堆,顆粒間存在孔隙。(見圖 11左上圖) sj-2 放大80000倍,二氧化矽相 表面集結為緻密塊狀,形成平面,塊與塊 間存在孔隙,排列規則。(見圖11左下、 右下圖) sj-2放大15000倍時,呈現纖維 狀,參考前人研究<sup>[11]</sup>,推測為與蛋白石 共生的纖維狀坡縷石。(見圖11右上圖)

無變彩的部分,二氧化砂小球不是渾圓 的,分佈不規則,間隙較大,顆粒邊緣無 定形,不規則團聚成堆。(見圖11);有 變彩的部分,二氧化矽小球規則分佈,呈 緊密堆積。

## 3 結論

(1)澳大利亞閃電嶺歐泊的種類有白歐 泊,黑歐泊,水晶歐泊,緻密塊狀構造, 隱晶質結構,水晶歐泊呈半透明到微透 明,黑歐泊、白歐泊為半透明,點測折 射率1.43-1.46,紫外熒光下均有藍紫色熒 光。

(2) 偏光顯微鏡下觀察,其主要礦物為蛋 白石,次要礦物有石英等。紅外光譜表現 為典型的蛋白石譜圖。紫外—可見光光譜 顯示部分黑歐泊樣品在580nm-750nm處具 有吸收,匹配為Fe<sup>3+</sup>的吸收帶。XRF分析 得到澳大利亞閃電嶺歐泊的黑色可能受Ti 元素影響。

(3) X射線粉晶衍射分析得出歐泊是由非晶 質→晶質集合體之間連續漸變的,掃描電 鏡觀察發現水晶歐泊含有與蛋白石共生的 纖維狀坡縷石。

## 【致謝】感謝何**雪梅老師和張天翼**碩士的 傾心指導。

## 項目基金: 本項目依託大學生創新創業項目完成, 項目編號為S202111415131

作者簡介: 楊佳睿(2001-),女,本科在讀, 寶石及材料工藝學, Email:18610740921@163.com

#### **通訊作者:** 何雪梅(1964-),女,教授,主要從事寶

玉石學相關的教育與科研工作, Email:hexuemei3127@126.com

## 參考文獻

- [1] 鐘媛媛.不同產地歐泊的寶石礦物學特徵[J]. 《中國寶玉石》.2020年第2期P34-41頁
- [2] 彭文、蔣天龍.澳大利亞庫伯佩地"水晶歐 泊"寶石學特徵[J].寶石和寶石學雜誌2018, (201):122-128
- [3] 潘鑫、郭穎.火歐泊的顏色三要素特徵[J].中國 寶玉石,2020,(1):94-105
- [4] 嚴俊、胡仙超、方飚等.應用XRF-SEM-XRD-FTIR等分析測試技術研究麗水藍色類歐泊(蛋 白石)的礦物學與光學特徵[J].岩礦測試,2014, 第33卷(6):795-801
- [5] 趙俊.非洲歐泊的寶石礦物學特徵對比研究[J]. 科學技術創新,2021,(27):81-83
- [6] 於方、範桂珍、翁詩甫、劉岩、孫淼、徐玉 杰.埃塞俄比亞染色歐泊的研究[J].岩石礦物學 雜誌,2014,33(S2):123-139
- [7] 趙海平、張雪梅、何雪梅.坦桑尼亞綠色蛋白石[J].寶石和寶石學雜誌,2014,(4):14-21
- [8] 任慧聰、於方、範桂珍、徐玉杰.緬甸蛋白石的 寶石學特徵[C]//.珠寶與科技.中國珠寶首飾學 術交流會論文集(2015),2015:120-123
- [9] 元利劍、黃藝蘭、殷科.俄羅斯人工歐泊的特徵及其變彩效應[J].寶石和寶石學 雜誌,2006(03):10-15.DOI:10.15964/ j.cnki.027jgg.2006.03.005
- [10] 劉迎新、張琳琪、施光海、莊偉.蛋白石的寶石 學及二氧化矽相組成特徵[J].中國科技論文, 2017,第12卷(15):1717-1724,1744

