

浅析歙砚纹理的成因及发墨机制

唐甘宇, 赖 勇

(北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要:歙砚作为我国四大名砚之一,具有很高的经济及艺术价值。为探究歙砚特有纹理的成因和歙砚发墨机理,对江西婺源的歙砚样本进行了光学显微镜、环境扫描电镜、电子探针和能谱等的观察和测试,结果表明歙砚原石的主要组成矿物为绢云母、石英和绿泥石;歙砚的不同纹理形态受控于原生矿物的变质作用程度以及原岩的应力变形作用。结合镜下微观结构和砚锋机制,提出在发墨过程中石英提供了粗磨作用,绢云母和绿泥石提供了细磨作用。通过计算砚锋密度,认为歙砚属于高密度锋一类,从数值的角度定量评估了歙砚的实用属性。再结合自磨刃机理解释了歙砚能够长久维持“滑不拒墨”优异表现的原因。在与其他砚台的比较中,歙砚从观赏性和实用性两方面都表现出了突出的优势。

关键词:歙砚; 纹理成因; 发墨机制

中图分类号: P588.34⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)03-0562-13

A brief analysis of forming reasons of the She inkstone texture and ink-making mechanism

TANG Gan-yu and LAI Yong

(The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: As one of the four famous inkstones in China, She inkstone has high economic and artistic value. She inkstone samples were collected in Wuyuan, Jiangxi Province. To explore the causes of the unique texture of She inkstone, and the mechanism of ink generation in She inkstone, this paper has observed and tested samples under optical microscope, environmental scanning electron microscope (ESEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and electron microprobe (EMPA). The results have indicated that the main minerals of She inkstone include sericite, quartz and chlorite. It has also found that the She inkstone's different texture is controlled by the degree of metamorphism of primary minerals and the stress deformation of original rock. Combining its microscopic structure and inkstone edge mechanism, quartz provides coarse grinding, sericite and chlorite provide fine grinding during the ink-making process. By calculating the density of She inkstone's edges, this paper argued that She inkstone is belong to high-density group, and quantitatively evaluated the practical properties of She inkstone from a numerical perspective. Combined with self-sharpening edge mechanism, this paper explains why She inkstone can maintain excellent ink-making performance for a long time. In comparison with other inkstones, She inkstone shows outstanding advantages in both ornamental and practical aspects.

Key words: She inkstone; forming reasons of texture; ink-making mechanism

收稿日期: 2022-11-22; 接受日期: 2024-03-11; 编辑: 尹淑萍

作者简介: 唐甘宇(1999-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 2101110630@pku.edu.cn; 通讯作者: 赖 勇(1963-), 男, 博士, 教授, 从事矿床学、流体包裹体地球化学研究, E-mail: yonglai@pku.edu.cn。

歙砚作为我国四大名砚之一,兼具实用和收藏价值,自古以来受到文人墨客的竞相追捧,其中以苏轼“涩不留笔,滑不拒墨,瓜肤而縠理,金声而玉德”的评价最为形象和精准。“滑不拒墨”体现了歙砚砚堂表面润滑却又能快速下墨和起墨的特点;“瓜肤而縠理”则惟妙惟肖地表现了歙砚石材具有纱般的皱纹和冬瓜皮般坚老滞手(王俊虎,2010)。歙砚文化历经千余年的发展与沉淀,已经形成了一套完整的包含质、色、纹三个维度的鉴定评估体系(胡中泰,2003;潘华华,2008)。质,体现在砚台的石质和结构上,在三个评估维度上所占比重最大。过去人们往往只能通过研磨过程中的感觉来评估歙砚质感的好坏,现在则可以通过粒径分析快速进行最基础的筛选。色,顾名思义就是砚石的颜色。一般来说,颜色受矿物成分控制,大部分的砚石主体都是相近的颜色,在基本色上呈现出的其他颜色越丰富,色彩对比越强烈,歙砚的价值就越名贵(李志群,2000)。纹,是存在于歙砚中的天然纹理,也是区分歙砚种类的最重要的鉴别标准,一般可以按照纹理分为罗纹、眉纹、金星、金晕和鱼子五大类(胡中泰,2003)。5种纹理各有其独特的美感,少量歙砚由多种纹理组合而成,在砚面上相映成趣,更是难得一见的精品。

歙砚的制作工艺早已被列为第一批国家级非物质遗产之一(洪杰等,2012)。但关于歙砚的相关研究和讨论大多集中在观赏价值、文化属性以及加工工艺等方面,而缺乏从更微观和科学的角度对歙砚的“滑不拒墨”、“瓜肤而縠理”特点的成因剖析。本文使用现代微观分析技术探讨其成因和机理,主要通过光学显微镜和环境扫描电镜观测歙砚的微观结构特征,并结合能谱和电子探针数据得出其主要的矿物组构。通过分析微矿物的形态和组合方式,探讨歙砚不同纹理的成因和各自的发墨机制。以砚锋密度和自磨刃机理为评判基础,解释歙砚在发墨能力方面表现优异的原因。研究尝试从数值的角度定量评估歙砚的实用属性,并在最后与其他产地的歙砚和不同类型的名砚进行了综合的对比分析。

1 区域地质背景

歙砚全称为歙州砚,产于安徽黄山与天目山、白际山之间的歙州,包括歙县、休宁、祁门、黟县、婺源等县(方韶,2012)。核心区为婺源县溪头乡的龙尾

山,故又称之为龙尾砚(刘志斌,2009)。本文的歙砚原石样品采自溪头乡的龙尾山(图1)。由于分布范围较广,开采历史悠久,故不同地区不同时间开采出的歙砚鉴赏评估标准有所不同,除特别说明外,本文所指的歙砚均为龙尾砚。歙砚产区区域上位于扬子板块和华夏地块交界处的江南造山带中部,北东倾伏一侧的鄣公山陆缘弧后盆地冲褶带内。该区域主要受到东北-西南走向的皖浙赣复合断裂带控制。出露地层主要是上元古界溪口岩群,自下往上依次为蓟县系的板桥岩组(Pt_b)、木坑组(Pt_m)和牛屋组(Pt_n)地层(马荣生,2002;吴新华等,2005)。

板桥岩组主要由深灰色到黑色变质粉砂岩构成,常表现为粉砂质板岩与粉砂质千枚岩的互层,向上逐渐出现砂质成分,该组较为富碳,并发育有零星分布的黄铁矿颗粒。木坑岩组整体变质程度略高,基本上为粉砂质千枚岩或者板状千枚岩,底部主要表现为灰绿色,向上颜色逐渐变为紫红,该层位也是歙砚原石的主要赋存层位。牛屋组中碎屑岩的平均粒径变大,主要是砂质千枚岩和砂质板岩的互层,也有粉砂质板岩的存在,偶见含砾石的夹层(廖圣兵等,2014;徐生发等,2017)。

该地区分别于新元古代和晚侏罗-早白垩世时期发育了两期规模较大的岩浆活动。新元古代的岩浆活动造成东南侧大范围的花岗岩侵入。晚侏罗-早白垩世的岩浆活动强度较低,形成一些零星出露的二长花岗岩和花岗闪长岩小岩体(胡鹏等,2014)。构造-岩浆活动给该地区沉积地层的变质过程提供了热源和动力,为歙砚砚石的形成确定了明确的地质演化背景(芦建文等,2018)。

2 样品特征与研究方法

歙砚砚台样品采集自江西省婺源县溪头乡的龙尾山一带。从岩石学角度,歙砚砚石可定名为粉砂质板岩到千枚岩。粉砂质的颗粒粒径在3.9~62.5 μm之间,故笔触有细腻之感。在发墨的过程中,这种大小的粒径既不会因为太粗造成墨中残留有未破碎的颗粒,也不会因为太细而让墨锭在研磨过程中打滑,在发墨速度和质量中实现完美平衡,达到“滑而不拒”的迅速发墨效果。刚采集时的歙砚原石,由于表面较为粗糙,漫反射现象严重,呈现出青灰色。在后期加工过程中,随着打磨抛光程度的提高,漫反射逐渐减弱,镜面反射和千枚岩化带来的丝绢光泽逐渐

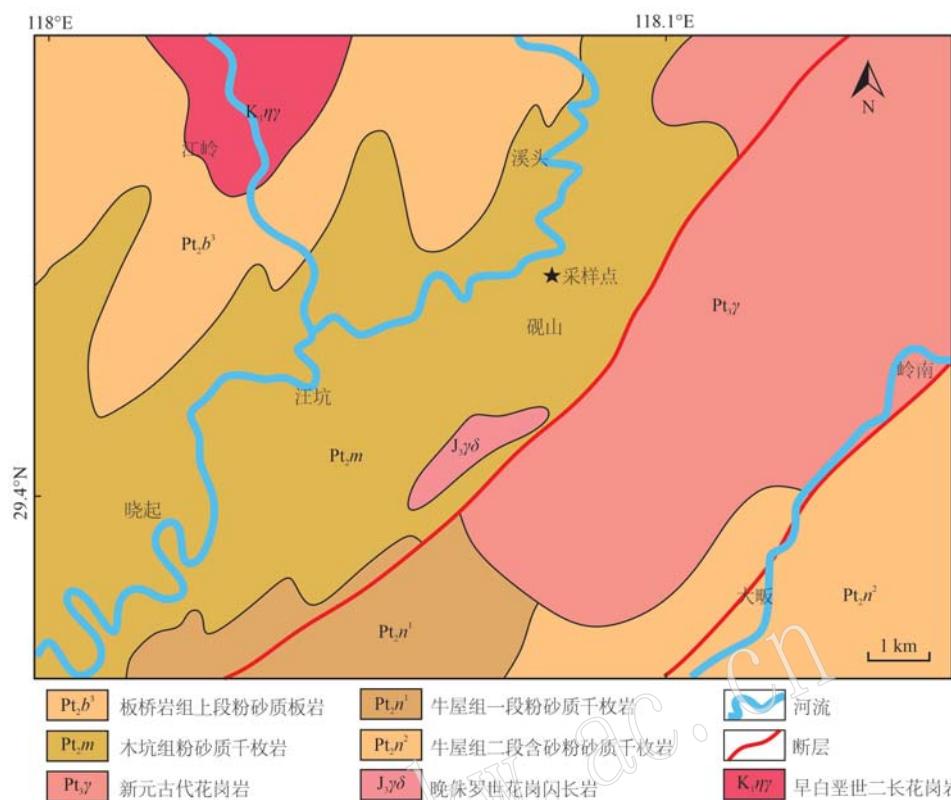


图1 犀砚(龙尾砚)主产区区域地质图(中国地质调查局发展研究中心, 2006)^①

Fig. 1 The sketch geological map of main producing area of She inkstone (Longwei inkstone) (after Development and Research Center, National Geological Archives of China, 2006)^①

占到了主要地位, 最终呈现出青黑色的基本色。偶尔由于 Fe 等元素的局部富集, 可以产出红色、青色、黄色、绿色的歙砚, 是歙砚中难得一遇的孤品(胡中泰, 2003)。

不同的歙砚具有不同的纹理特征。罗纹是五大类纹理中最基础的一类纹理, 取自绫罗绸缎中的罗字, 故表现出如丝织品一般的光泽, 随着纹理粗细和疏密的周期性分布产生明暗上的差别, 并往往可以作为其他几类纹理的基础底纹。罗纹中的细罗纹纹理细密, 且分布均匀, 品质更高, 发墨较快且便于雕刻(图 2a)。若纹理交织成趣, 如同湖面上因风而泛起的水波, 富有动感, 亦属于罗纹大类下的一种, 被称为水波罗纹(图 2b)。眉纹又称之为眉子, 纹理呈条状分布, 如美人娥眉, 底色青莹, 十分素雅。样品纹理交织成片, 如波涛翻滚的海面, 故归为海浪眉纹, 碎浪连绵, 动感十足(图 2c)。金星往往呈现出

金黄色点状物, 在青黑色为底的砚台中十分突出显眼, 如同天上的明星。金星纹有大有小, 聚散不一, 可与眉纹和罗纹共同组合, 细分为不同的品类。金星若纤长有致, 方向均一, 如同天上斜落飘洒的雨滴, 富有动感, 则称之为雨点金星(图 2d)(韩露等, 2017)。金晕则没有明显的中心, 分布较为弥散, 呈云雾状分布, 在砚石中自然渗透。鱼子与金星相反, 是砚石中出现的细小黑点, 分布较为随机, 可以与金星和金晕共存。本次采集的样品暂未出现金晕与鱼子的纹理。

实验样品分别沿平行和垂直于纹理的两个方向进行切割, 选取纹理清晰的新鲜面磨制成探针片, 厚度为 0.05 mm, 用于岩相学分析。探针片的微观特征观察使用 Nikon ECLIPSE LV100POL 显微镜, 使用 Nikon DS-Ri1 显微数码摄像头和 NIS-Elements F3.2 软件进行透射光和反射光下样品照片的处理及分析。

① 中国地质调查局发展研究中心. 2006. H-50-23 吐溪幅 1:20 万区域地质图空间数据库.



图2 不同纹理的歙砚样本

Fig. 2 She inkstone samples of different textures

环境扫描电镜实验和能谱分析实验在北京大学电子显微镜实验室进行。场发射环境扫描电镜(ES-EM)型号为 Thermo Scientific Quattro ESEM, 工作距离为 10 mm, 工作电压为 15 kV。能谱分析实验利用与 ESEM 相连的能量色散 X 射线光谱(EDS)进行, 工作距离为 10 mm, 工作电压为 15 kV。样品表面镀层为 10 nm 厚度的碳膜。使用 ChemiSEM 技术绘制所测样品的元素相分布图。

矿物电子探针分析实验在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成, 采用 JXA-8320 型电子探针, 工作电压为 15 kV, 电流为 20 nA, 电子束直径为 5 nm。

3 �歙砚的镜下微观特征及纹理形成模式探讨

首先通过光学显微镜对各类花纹的砚石样品切片进行了观测。镜下样品矿物颗粒细小, 呈鳞片状结构, 仅能粗略地识别出绢云母和石英两种主要矿物, 以及作为副矿物的不透明含铁矿物。

在单偏光条件下观测眉纹纹理的微观特征显示, 在从泥岩向千枚岩变质的过程中, 随着岩石受应力作用的增大, 原生层理发生形变, 并在另一角度上产生新的片理, 当片理发育到一定程度, 就取代了原

生层理成为主纹理。片理与原始沉积层理相交, 破碎的矿物在应力作用下发生重结晶并重新定向排列, 绢云母富集体在片理面上呈现出较强的丝绢光泽, �歙砚砚石往往还没有完全转变为典型的千枚岩。由于初始沉积中的不均一性, 不同层位受到应力作用所发生的变形程度也不一致, 故形成的微褶皱形态也往往有一定差别。同时在更大的尺度上, 微褶皱的分布密度也会具有差异, 产生更大周期上的疏密变化, 从而构成不同尺度的眉纹纹理(图 3a)。

罗纹纹理在镜下也呈现出明显的原生沉积层理, 同样是由于层理的不均一性, 在侧向挤压中所产生的微褶皱也表现出显著的差异, 部分区域的褶皱变形过于剧烈甚至产生了微断裂, 在断裂附近可以明显看到由于风化作用带来的脱色现象。与眉纹最大的区别是, 眉纹纹理的形成通常仅受到一组应力的影响, 而罗纹则往往是多组应力共同作用的结果。在正交偏光下, 应力造成的结果会更加显著, 可以见到明显的纹理相交。通过矿物的定向排列可以推断出初始沉积层理的大致方向, 根据褶皱断裂的情况可以知道主纹理的方向, 这也是主应力的方向, 副纹理则不太清晰, 受到的应力为次要应力, 故相对分布较为稀疏, 主要是通过正交偏光下的光性差异进行辨别。在薄片中, 由于副纹理不够明显, 观测视角又

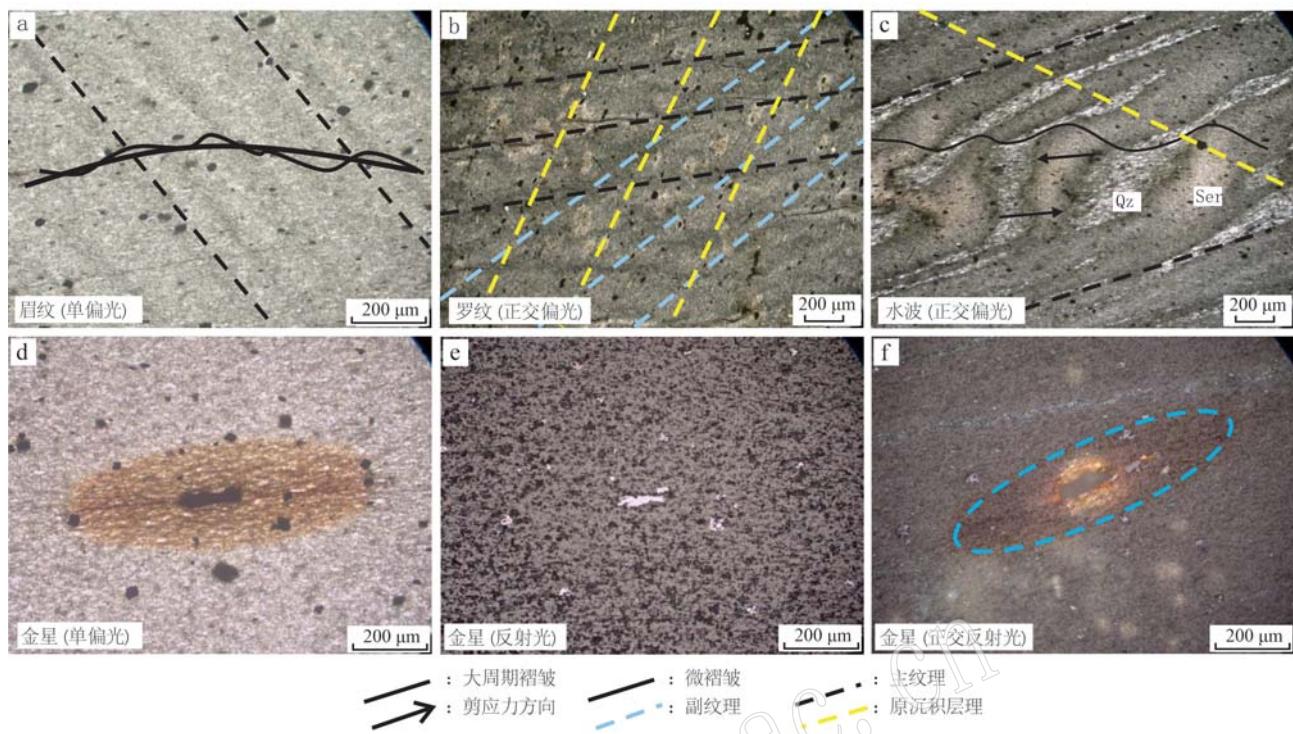


图 3 犀砚纹理的镜下特征

Fig. 3 The microscopic features of She inkstone texture

Qz—石英; Ser—绢云母

Qz—quartz; Ser—sericite

近似垂直,导致现实中仅能看到一组明显的纹理,即罗纹(图3b)。

如果原岩在千枚岩化过程中受到多方应力作用且更为强烈,则会造成矿物分布发生差异化,出现其他特殊的罗纹,例如样品中的水波罗纹(肖化云等,1999)。不管是从宏观上还是镜下都能很明显地看出矿物的分层现象,中间透明程度较高的部分主要成分是石英,呈边界不规则的粒状结构,粒度更细的部分主要是绢云母。可以根据变形较弱区域矿物的定向排列判断出初始的沉积层理,通过石英条带的走向判断其中一组压应力的方向,通过石英集合体所形成的S形结构,可以判断出另一组剪应力的方向(图3c)。

金星纹理主要是通过含铁矿物及其不同程度的浸染,以及在砚台表面的特殊排列方式产生的,与岩石变质过程关系不明显(韩露等,2017)。一般的金星纹理未受到应力影响,呈现出圆点状,本次所采集的样品为较特殊的雨点金星。原岩变质过程中所受到的应力作用较为单一,千枚岩化程度也不是很高,原生的黄铁矿在压力和流体的作用下发生变形和氧

化作用,将周围的沉积物染色形成梭形黄褐色晕斑,自身也最终氧化变形拉长为它形的赤铁矿(图3d)。通过在反射光下的观测,在金星纹理周围的沉积物中的暗色矿物是呈自形结构的钛铁矿,未发生染色和变形,该期次钛铁矿可能形成于变质作用之后,由残余沉积物后期演变而成(图3e)。在正交反射光下观察,发现赤铁矿周围的沉积岩呈现橙红色,并随远离中心变浅,与宏观表现出的近似为金色有很大不同(图3f)。这可能是受到砚石青黑色底色的影响,宏观上会倾向于识别为对比度更高、亮度更大的金色;其次是镜面反射会带来亮度的增加,而在正交反射光下,镜面反射的光会被过滤掉,因此才能看到本色;当然,铁元素不仅仅以水和氧化物的形式填充石英等主要矿物之间的间隙,也可以以 Fe^{2+} 的形式填充到绢云母等层状硅酸盐的层间位产生黄色。

4 犀砚的环境扫描电镜观测及能谱分析

以矿物分布相对最为复杂的水波罗纹样品为主,其他样品进行对比参照,进行了环境扫描电镜,矿物谱学和电子探针的分析(图4)。根据扫描电镜

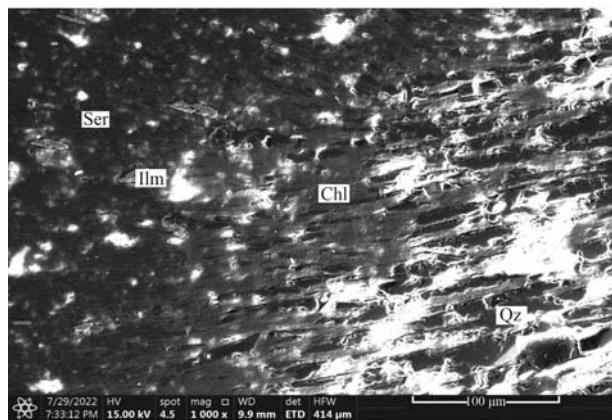


图4 �歙砚的环境扫描电镜镜下图像

Fig. 4 The ESEM images of She inkstone

Chl—绿泥石; Ilm—钛铁矿; Qz—石英; Ser—绢云母
Chl—chlorite; Ilm—ilmenite; Qz—quartz; Ser—sericite

下矿物明暗程度的不同,可以发现歙砚主要由3种矿物组成,分别是绢云母、绿泥石和石英。其中绿泥石根据能谱和电子探针数据所测定的元素含量进一步细分,可定名为蠕绿泥石(表1)。与其他砚石样品中具有相似特征矿物的能谱结果进行对比,发现同类矿物的化学组成在所有砚石样本中十分相似,指示了整个歙砚产区物源的统一性。

综合镜下的观测结果,可以确定歙砚的主矿物有含铁绢云母(55%,体积分数)、石英(20%)、绿泥

石(17%),次要矿物为钠长石(约7%)。副矿物中含铁的不透明矿物主要是钛铁矿,另有少量赤铁矿,还有磷灰石、磷钇矿、褐帘石、尖晶石等。由于绢云母的密度大于石英,故以绢云母为主的歙砚砚石的密度也会略大于一般的千枚岩,多为 2.74 g/cm^3 左右,这让歙砚更有质感和厚重感(张莹等,2008;程金华等,2013)。

结合能谱和电子探针数据,可以发现Na基本赋存在钠长石中;K基本赋存在绢云母中;Mg主要富集在绿泥石中,少量分布在绢云母中;Fe除了钛铁矿外,还主要富集在绿泥石中(表1)。水波罗纹样本的面扫结果显示,绢云母、绿泥石和石英3种矿物在应力的作用下呈现出明显的分布差异,S型透镜体的核心为他形的石英集合体,与绢云母形成了互层,绿泥石则几乎完全处于石英和绢云母之间(图5)。钠长石大体上与绢云母伴生,指示绢云母由钾长石蚀变而成;钠长石在低温下保持稳定基本没有发生蚀变被完整的保留了下来。钾长石蚀变过程中所分解出的石英,受到同应力作用而聚集在压力最小处,形成了石英条带。绿泥石是黑云母的蚀变产物,千枚岩的稳定域足够出现黑云母,且黑云母蚀变为绿泥石的过程中会释放出钛和稀土元素,这也是副矿物中出现磷钇矿和褐帘石的原因,释放出的钛与风化过程产生的游离的铁结合,形成了广泛分布的呈自

表1 �歙砚砚石中主要矿物元素成分数据

Table 1 Main mineral elements composition data of She inkstone

 $w_{\text{b}}/\%$

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	MnO	CaO	K_2O	Na_2O	Total
绢云母	53.15	0.44	33.01	2.75	1.59	0.05	0.00	4.59	0.32	95.90
	53.76	0.33	33.34	2.65	1.65	0.11	0.05	4.23	0.23	96.35
	51.55	0.40	32.42	6.45	2.45	0.04	0.02	5.11	0.11	98.55
	52.52	0.36	33.19	2.37	1.39	0.01	0.02	6.08	0.19	96.13
	48.90	0.37	30.38	5.47	1.86	0.00	0.04	5.95	0.65	93.62
绿泥石	24.42	0.06	20.66	30.34	9.83	0.37	0.04	0.01	0.00	85.73
	24.28	0.07	21.00	31.22	9.77	0.27	0.02	0.00	0.01	86.64
	24.60	0.11	20.78	30.26	10.29	0.28	0.00	0.01	0.00	86.31
	25.33	0.06	20.94	30.21	9.62	0.30	0.09	0.03	0.37	86.94
	29.59	0.02	19.74	29.85	8.89	0.37	0.04	0.05	0.05	88.60
	24.30	0.06	20.85	30.78	9.56	0.36	0.04	0.04	0.18	86.16
钠长石	71.76	0.03	18.28	0.36	0.01	0.00	0.10	0.13	9.17	99.84
	67.87	0.02	20.33	0.33	0.00	0.03	0.11	0.08	10.50	99.26
钛铁矿	0.07	54.51	0.00	43.42	0.01	2.08	0.01	0.03	0.02	100.15
	0.00	53.86	0.00	43.19	0.05	1.80	0.01	0.04	0.02	98.98
	0.12	53.41	0.036	41.79	0.05	2.31	0.09	0.16	0.00	97.96
	0.14	53.60	0.01	45.25	0.03	2.25	0.00	0.07	0.00	101.34
石英	98.44	0.00	0.07	0.28	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	98.84
	90.95	0.00	3.08	3.24	1.175	0.00	0.01	0.10	0.05	98.60

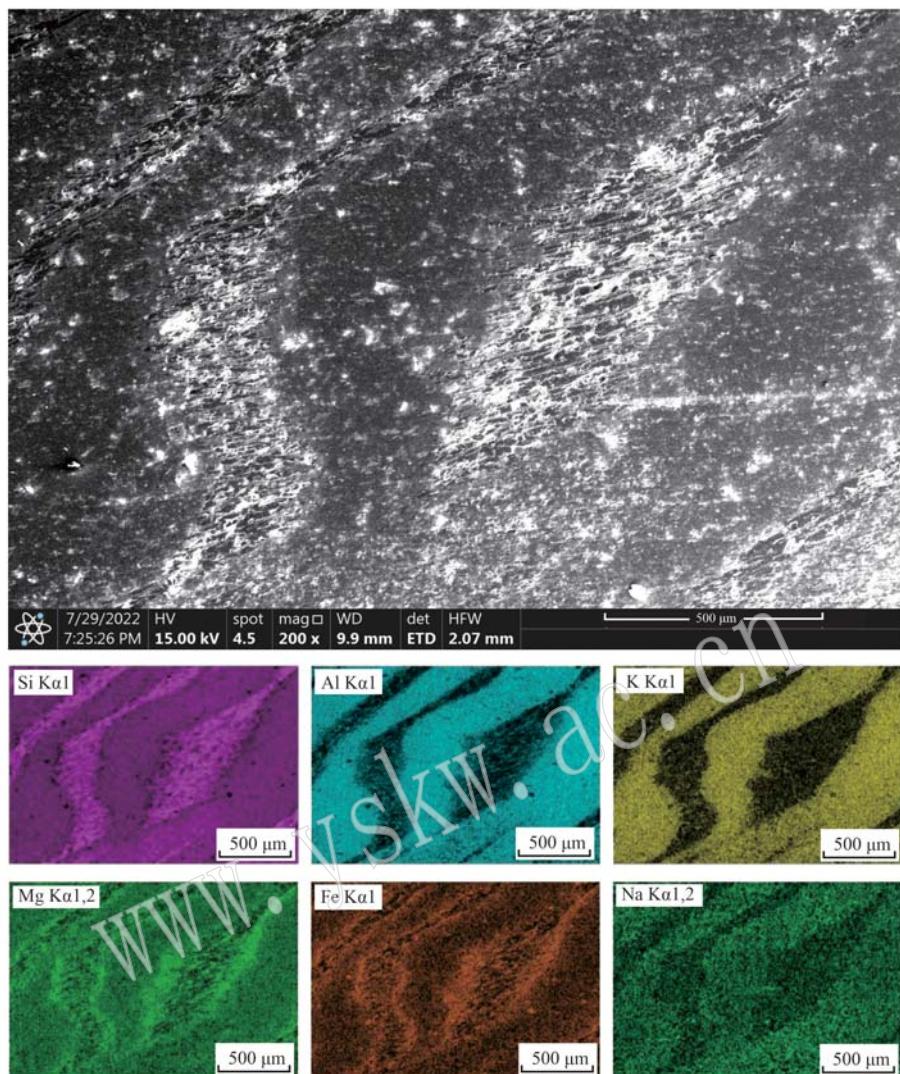


图 5 水波纹理的环境扫描电镜图像及元素分布特征(Si, Al, K, Mg, Fe, Na)

Fig. 5 The ESEM images and element distribution patterns of shuibo texture (Si, Al, K, Mg, Fe, Na)

形晶结构的钛铁矿(钟福军等, 2017)。钛铁矿通常发育在基性、超基性岩及碱性岩、酸性岩岩浆作用过程中, 在千枚岩中产出并不常见, 其成因值得进一步深入研究。

选取细罗纹样本褶皱变形最为剧烈的区域, 发现在褶皱中存在有裂隙(图 6)。能谱面扫结果显示 K 在裂隙附近发生了显著的富集, 其他元素则表现为亏损。同时 K 的富集没有呈现出明显的晶体边界特征, 并且截然地切断了原本连续排布的矿物序列, 说明形成的矿物颗粒较为细小, 这是发生了强烈风化黏土化的表现, 此处的绢云母已经进一步向伊利石开始演变。

重点观测了金星样本赤铁矿周围的晕染现象

(图 7), 可以发现在整个金星纹理的尺度下, 仅有 Fe 与颜色呈现出显著的相关性, 从核部向四周富集程度逐渐降低, 其余元素分布较为均匀。说明金星的颜色与 Fe 相关, 是通过 Fe 的扩散晕染而显现的, 并且基本没有影响到初始沉积矿物的骨架结构, 没有产生新的矿物, Fe 要么填充在晶体间隙中, 或者仅仅取代矿物层间的阳离子。核部为切削过程中所形成的孔洞, 故与金属元素分布无关。

5 犀砚发墨机制的探讨

发墨的实质是砚石表面对墨锭的切削与研磨, 而刃则是切割工具发挥作用的主要部位, 作为一个

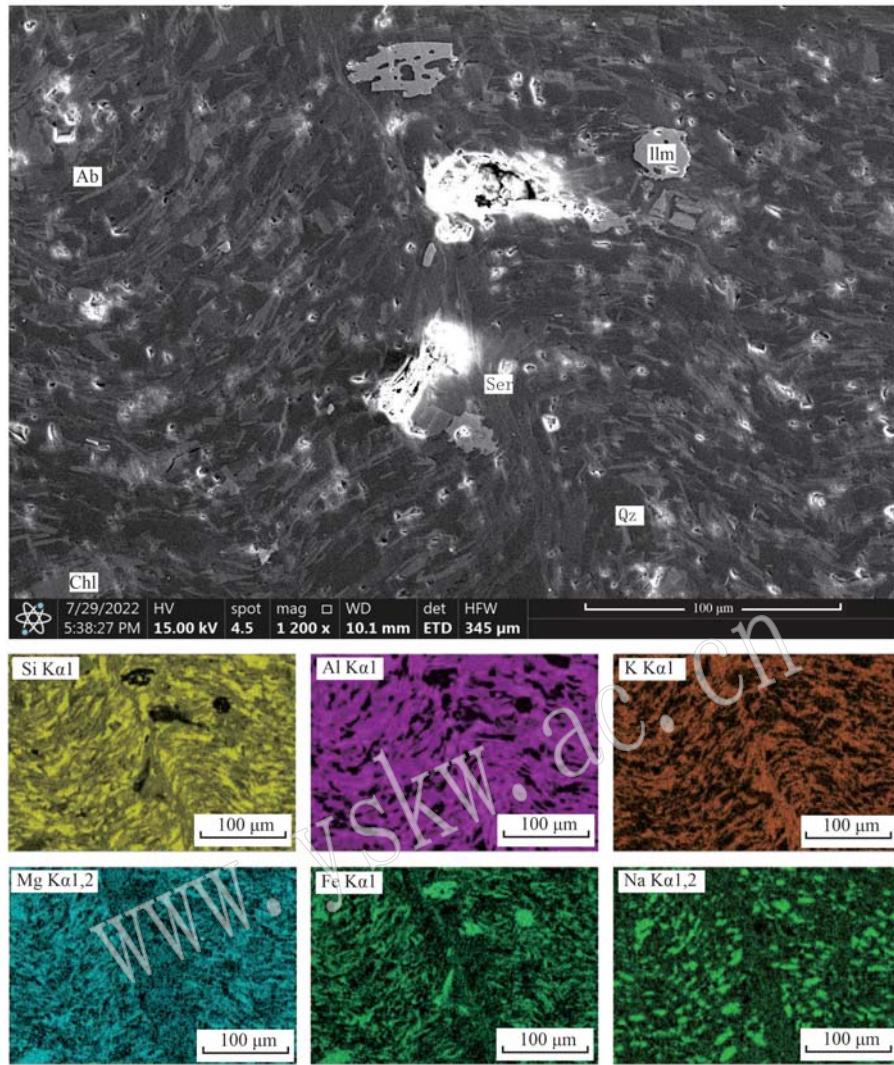


图 6 罗纹纹理的环境扫描电镜图像及元素分布特征(Si, Al, K, Mg, Fe, Na)

Fig. 6 The ESEM images and element distribution patterns of luowen texture (Si, Al, K, Mg, Fe, Na)

Ab—钠长石; Chl—绿泥石; Ilm—钛铁矿; Qz—石英; Ser—绢云母

Ab—albite; Chl—chlorite; Ilm—ilmenite; Qz—quartz; Ser—sericite

整体,砚石充当了类似于锉刀的功能,是二维尺度上的面型刃。从微观上刃由锋构成,则砚台上的锋可称之为砚锋,砚锋根据形态的不同,可以分为点状锋和线状锋,如果局部锋的分布较密可以一并视为面状锋。可以以砚锋密度(ρ , μm^{-1})作为评判,定义为*i*区域内,线状锋的总长度 $\sum l_i$ (μm)和与区域总面积 S_i (μm^2)的比值,即 $\rho = \sum l_i / S_i$ 。若考虑点状锋,则定义为*i*区域内点状锋的总数 ΣN_i 与区域总面积 S_i 的比值,即 $\rho = \Sigma N_i / S_i$ 。根据砚锋密度(ρ)的大小,可分为4种类型, $\rho < 0.6$ 称之为疏锋型, $0.6 \leq \rho < 1$ 称之为中锋型, $1 \leq \rho < 1.5$ 称之为密锋型, $\rho \geq 1.5$ 称之为高密锋型。一般认为砚锋密度(ρ)在 $0.6 \sim 1.5$ 之间

的中锋型和密锋型能得到最好的发墨效果(郑辙等,1988)。

理论上对砚锋密度的测量需要在观测精度至少达到微米级的显微镜下进行,逐一统计各片状矿物的线状锋长度和点状矿物的个数,之后再进行进一步的计算。但也可根据砚锋密度的直观表现判断,砚锋密度越大,单位面积内锋的数量或总长度也就越大,这就意味着各个锋之间的间隔也会越小,故可以通过单位面积内,相邻砚锋之间的平均间距来反推砚锋密度。当砚锋的平均间距为 $1 \mu\text{m}$ 时,其对应的砚锋密度即为1,砚锋平均间距和砚锋密度两者之间大致呈现为反比关系。相对于原始定义,该

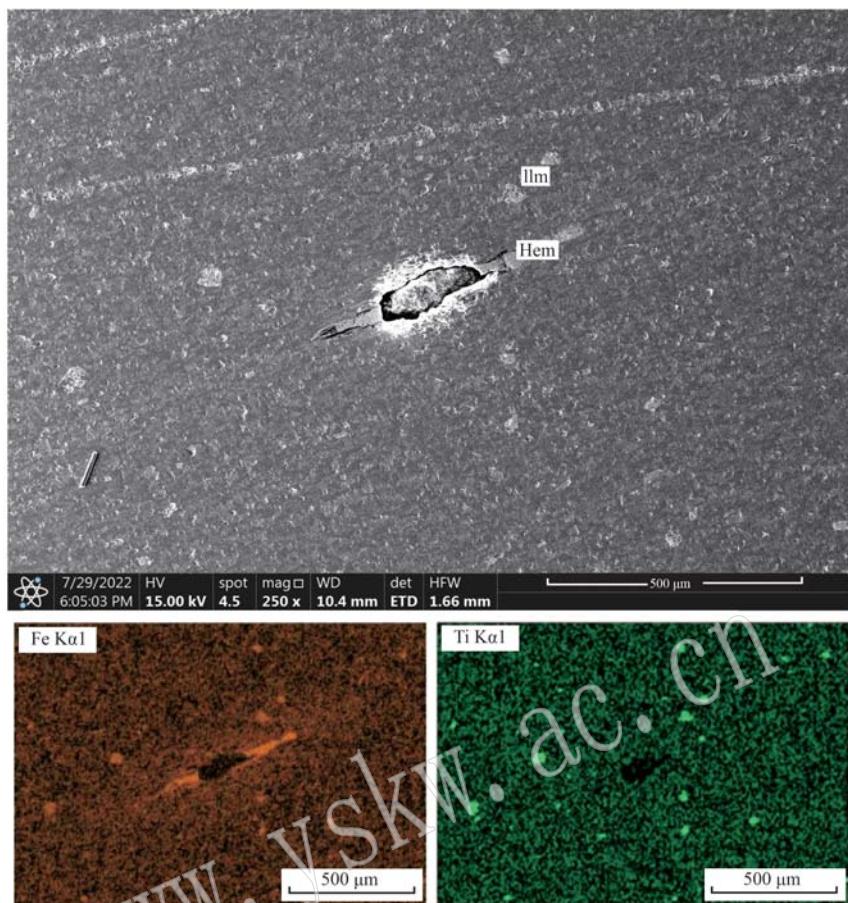


图 7 金星纹理的环境扫描电镜镜下图像及元素分布特征(Fe, Ti)

Fig. 7 The ESEM images and element distribution patterns of Jinxing texture (Fe, Ti)

Hem—赤铁矿; Ilm—钛铁矿

Hem—hematite; Ilm—ilmenite

方法巧妙地规避了冗长而复杂的统计过程,在较短的时间内就能给出相对精确的结果。通过对所采集数据

样本的镜下观测,统计归纳了不同矿物所表现的砚峰形式,并估算出了对应的砚峰密度范围(表2)。

表 2 穗砚石及其主要矿物的砚峰特征

Table 2 Edge features of She inkstone and its main minerals

	石英	绢云母	绿泥石	钛铁矿	穗砚石
砚峰类型	点状锋为主	线状锋	线状锋	点状锋	点线结合
砚峰平均间距/ μm	2~5	0.6~1.5	0.5~1.3	>10	0.8~1.0
砚峰密度/ μm^{-1}	0.2~0.5	0.7~1.6	0.8~2	<0.1	~1.1
砚峰效果	粗磨	细磨	细磨	粗磨, 可忽略	粗细磨均衡

由于砚台生产过程中所需打磨的程度略低于岩石薄片的抛光需求,故镜下观测的矿物微观特征能够近似反映出砚台的实际工作状态(胡鹏浩等, 1999)。结合砚石矿物组成和性质,可以得到一个穗砚普适的发墨机理。石英的硬度较高且发育贝壳状断口,在对砚台表面打磨之后往往会高于砚台表面,

一般以点状锋的形式存在(图8a)。其硬度和突起让石英成为了发墨过程中第一批起效的矿物,主要充当粗磨的作用,少量强变形的他形细粒石英晶体也能进行细磨。与石英起到相似作用的矿物还有在砚石中经常见到的钛铁矿,钛铁矿由于是后期蚀变过程中才生成,故其粒径往往大于石英等主要矿物,

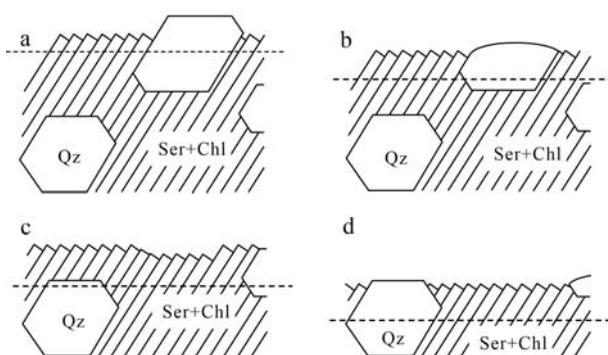


图 8 自磨刃机制演变过程示意图(石英代表点状锋,绢云母和绿泥石代表线状锋,虚线表示磨蚀面)

Fig. 8 Evolution schematic diagram of self-sharpening edge mechanism (quartz represents punctiform edges, sericite and chlorite represent linear edges, dotted line represents abrasion surface)

Chl—绿泥石; Qz—石英; Ser—绢云母
Chl—chlorite; Qz—quartz; Ser—sericite

能起到更为快速的粗磨效果,但由于钛铁矿数量较少,仅起到辅助作用。

绿泥石和白云母都是层状硅酸盐的一种,层内强度很大,但层间的结合非常弱,有一组极完全解理。鳞片状矿物的边缘可以起到线状锋的效果,并且刚性很强,理论上每一个结构基元都能形成一个线状锋,故可以达到非常高的砚锋密度。虽然砚锋密度过高会影响切削的时长,也会造成打滑拒墨,但提供粗磨作用的石英已经破碎了大块的墨体,并增大了摩擦力,很好地抵消了砚锋密度过高的不良影响。唯一不足的就是线状锋受到垂直解理面的应力时容易折断。但广泛发育的片状矿物形成了一个整体,表现为叠瓦状排列。由于片状矿物的晶体大小远远大于层间距,故所有的片状矿物都被连锁起来形成了一个整体,此时在垂直解理面的方向上表现为挠性,极大地延长了线状锋的寿命。

对一般的刃面来说,长时间的使用后,初始的点状锋和线状锋都会因磨损而失去切削能力。但歙砚的砚锋由于刃面与解理面斜交,呈叠瓦状分布的线状砚锋不会消失,而是沿着解理面不断下移,相当于随时有新砚锋的产生,这种性质被称为自磨性或者自砺性(图 8b)。但是像石英这样的点状锋矿物就没有这种性质,其更新模式主要是通过其他矿物的磨损,暴露位于其他水平面的新矿物来达到(图 8c、8d)。

当然具体到不同纹理的歙砚,除了基础的发墨

机制外还会有一定的独特性。例如对于单纯的金星纹理,赤铁矿的存在相对较为广泛,由于赤铁矿粒径大硬度高,往往成为首批提供粗磨的矿物,并且也容易在打磨过程中从砚石中被剥离开来,形成孔洞,赤铁矿存在时的凸起与剥离后的孔洞带来了较大的高度差,弥补了单一的纹理研磨不足的问题。罗纹和眉纹由于受到复杂的应力产生了微褶皱,微褶皱作为一个整体也能产生一定的粗磨效果,如果因应力过强而发生了破碎,破碎带也能充当线形锋使用。同时应力给绢云母等层状矿物带来了变形,让原本的直线锋变成了曲线锋,而曲线锋的抗剪切能力远高于直线锋,这就大大增强了砚台的耐用性和强度。水波纹理往往是平均发墨效果最好的一批纹理之一,由于受应力作用矿物发生了差异性富集,石英的聚集区形成了粗磨区,而绢云母等的聚集区则形成了细磨区,两种区域相间分布综合了切削性和研磨性,不管从任何角度使用何种手法都能达到很好的研磨效果(李刚等, 2016)。水波纹理可以直接从宏观上反映出砚锋的分布方式,为评估歙砚的发墨效果提供了较大的便利。由于水波纹理的石英主要来自于后期钾长石的蚀变分解,故最终形成以他形粒状结构石英为主的聚集体(王慧等, 2016)。与其他纹理中粒状石英占主体的现象有所不同,这也让石英拥有了一定程度上的自磨性,相较于其他纹理拥有特殊优势。

6 不同产地的歙砚与其他名砚的对比

古歙州辖区除了今江西婺源以外,还包括了今黄山市和宣城市的部分地区,在古歙州州治歙县,产有歙砚中的另一大品类——龙潭砚。龙潭砚砚石产出层位为大谷运组(Ptd)上段,该组覆盖于牛屋组上部(任明军等, 2020)。龙潭砚的层位比龙尾砚的层位要浅,故变质程度也更低,往往仅表现为板岩,主要的岩性为灰黑色砂质粉砂质板岩。千枚岩相对于板岩,所受应力变形程度更高,故对矿物形变和定向分布的影响更为显著,可以产生新的砚锋,增大了砚锋密度,同时也能生成更具特色的纹理,这也是龙尾砚这类最早开采的歙砚平均品质要高于龙潭砚等后期歙砚的重要原因(王传田等, 2021)。其他同属于歙砚大门类下的还有九江砚、大畈砚、龙头砚、洪坑砚等,虽然综合平均品质不及龙尾砚,但也至少有一到两个不亚于龙尾砚的属性(程金华等, 2013; 任明

军等, 2019)。各产区砚石的主要矿物组成均为绢云母、石英和绿泥石, 相似的矿物特征涵盖了从赣东北到皖南的广大土地, 贯穿了上下数千米厚的地层, 这表明了初始沉积环境长期的稳定性。

表3 中国各类名砚的岩石学分类标准

Table 3 Petrological classification standard of various types of famous inkstones in China

		天然砚		人工砚
	碎屑岩	碳酸盐岩		
沉积岩	端砚(页岩)	山东红丝砚		
		吉林松花砚(灰岩)		澄泥砚
变质岩	洮砚(板岩)		贵州织金砚(大理岩)	
	歙砚(千枚岩)			

不同的砚石可以根据其原岩的岩性特征和变质程度等进行分类(表3)。四大名砚中, 端砚砚石岩性为粉砂质泥页岩, 相对变形和变质程度最为轻微, 其与鉴赏相关的花纹主要受副矿物分布不均的控制, 很少像歙砚一样涉及沉积或变形层理(刘寅良, 2002; 陈志强等, 2011; 卢友任等, 2011)。洮砚砚石主要表现为泥质到粉砂质板岩, 整体变质程度与歙砚有重合且略低, 鉴赏中层理是重要的参考标准之一, 由于副矿物相对歙砚较为繁杂, 故砚色丰富(杨春霞等, 2010)。澄泥砚虽然属于四大名砚之一, 但其为人工烧制的陶砚, 本文不作讨论。此外亦在名砚之列的山东红丝砚和吉林松花砚的主要成分是微晶方解石, 岩性属于截然不同的碳酸盐岩, 碳酸盐独特的结晶沉积过程让其无需经过后期的变质变形就具有独特的花纹(秦宏宇等, 2014; 李刚等, 2016)。若发生变质形成了大理岩, 则有贵州织金砚作为代表。碳酸盐岩类砚石的发墨效果一般要弱于碎屑岩类, 受结晶过程和晶形的限制, 碳酸盐矿物在发墨中起到的作用偏向于细磨, 与绢云母功能类似, 仍需要石英发挥主要的粗磨作用, 而该类砚石中石英含量往往在5%~10%之间, 是显著低于碎屑岩的。

7 结语与展望

通过镜下观测到的矿物微观结构及分布特征, 可以归纳出歙砚各类纹理的成因。首先所有纹理的形成都与原生沉积的不均一性相关。眉纹纹理是在

仅有一组明显主应力的作用下所形成的不均一的微褶皱的组合纹理, 罗纹纹理是在多组应力的共同作用下所形成的不均一的组合纹理, 其中特殊的水波罗纹是出现了应力作用下的矿物分异。金星纹理是相对独立的纹理成因, 主要是来源于初始沉积物中的原始含铁矿物, 在千枚岩化过程中发生的变形和浸出的结果。

歙研发墨机制与其矿物组成关系密切, 高硬度的石英略突出于砚台平面, 形成了点状砚锋, 率先进行粗磨机制, 达到迅速下墨的效果; 鳞片状的绢云母和绿泥石能够形成具有自磨性的砚锋, 经过长久的使用后依旧能够起到细磨的效果, 维持歙砚良好的发墨性能。歙砚中各种矿物之间的组成比例上佳, 能够控制砚锋密度在最佳值附近, 很好的平衡了粗磨和细磨的效果, 达到了“滑不拒墨”的最高境界。

中国千年以来的砚石文化发展至今, 被人所称颂的名砚并非屈指可数, 而无论是从观赏性还是实用性方面进行评估, 歙砚都是上乘的一类。虽然歙砚在颜色和花纹上表现得较为质朴, 但较高的变质和变形程度得以让原始沉积层理之上产生并叠加丰富的变质层理, 形成了独树一帜的纹理, 同时歙砚还拥有平均水准最高的质感和发墨性。这就是歙砚能够从历史的大浪淘沙中脱颖而出的原因, 无愧于四大名砚之位。

致谢 感谢两位匿名审稿人对本文中肯的建议和意见。

References

- Chen Zhiqiang, He Xiaoqing, Lu Youren, et al. 2011. Geochemical characteristics of trace elements of the Duanxi Inkstone [J]. Geochimica, 40(4): 387~391 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Jinhua and Ma Dong. 2013. Lithology, composition and physicochemical performance of the Hongkeng slate inkstone deposit, Jixi County[J]. Geology of Anhui, 23(2): 108~111, 115 (in Chinese with English abstract).
- Fang Shao. 2012. Historical evolution of She inkstone [J]. Journal of Hefei University of Technology (Social Sciences), 26(5): 85~87 (in Chinese with English abstract).
- Hong Jie and Wu Zhengting. 2012. Exploration of sustainable development of She inkstone industry [J]. Anhui Science & Technology, 283(9): 27~28 (in Chinese with English abstract).

- Han Lu, Yang Shan, Zhu Jiang, et al. 2017. Characteristics and genetic analysis of the grains of golden stars and halos in the she inkstones [J]. *Geology of Anhui*, 27(4): 317~320 (in Chinese with English abstract).
- Hu Peng, Chen Nengsong, Xu Xianbing, et al. 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Mesozoic granitic plutons and its geological significance in Wuyuan Region, the Southern Border between the Jiangxi and Anhui Provinces [J]. *Geological Science and Technology Information*, 33(4): 24~30 (in Chinese with English abstract).
- Hu Penghao, Fei Yetai and An Chengxiang. 1999. The research of polishing mechanism of She inkstone [J]. *China Mechanical Engineering*, 10(7): 736~738 (in Chinese with English abstract).
- Hu Zhongtai. 2003. The Identification and Appreciation of She Inkstone [M]. Wuhan: Hubei Fine Arts Press, 1~73 (in Chinese with English abstract).
- Li Gang and Wang Shiqi. 2016. A discussion on ink-making mechanism of Hongsi inkstones from Linqu, Shandong Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(S1): 175~181 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhiqun. 2000. Study on quality of inkstones in South China [J]. *China Mining Magazine*, 9(2): 12~15 (in Chinese).
- Liao Shengbing, Zhang Yanjie, Zhou Xiaohua, et al. 2014. Sedimentary sequence and sedimentary environment of Xikou Group in the adjoining areas of Anhui and Jiangxi [J]. *Mineral Resources and Geology*, 28(6): 660~667 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanliang. 2002. The Identification and Appreciation of Duanxi Inkstone [M]. Wuhan: Hubei Fine Arts Press, 1~75 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhibin. 2009. The historical overview and position of She inkstone in the development of inkstone history [J]. *Art & Life*, (4): 69~71 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jianwen and Han Qian. 2018. A study of Mesoproterozoic metamorphic rocks in Wuyuan of Jiangxi Province [J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, (2): 31~35 (in Chinese with English abstract).
- Lu Youren, Chen Zhiqiang, Yu Hengxiang, et al. 2011. Gemmological characteristics and identification of Duanxi inkstone [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 31(2): 198~201 (in Chinese with English abstract).
- Ma Rongsheng. 2002. Pre-Nanhua period lithostratigraphy in Southern Anhui Province [J]. *Resources Survey & Environment*, 23(2): 94~106 (in Chinese with English abstract).
- Pan Huahua. 2008. The preliminary discussion on methods of appreciation and evaluation standards of Shezhou inkstone [J]. *Journal of Shangrao Normal College*, 28(6): 89~93 (in Chinese with English abstract).
- Qing Hongyu, Xu Qiang and Cao Miaocong. 2014. The research on the occurrence and mineralogical characteristics of Jilin Songhua inkstone [J]. *Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Sciences Edition*, 15(4): 96~98 (in Chinese with English abstract).
- Ren Mingjun, Zhou Junlan, Qin Wei, et al. 2019. Geological characteristics of the host strata of inkstone in Shexian county in southern Anhui and the prospecting direction: A case study of the Shuangheku inkstone deposit [J]. *Geology of Anhui*, 29(1): 22~29 (in Chinese with English abstract).
- Ren Mingjun, Zhou Junlan, Qin Wei, et al. 2020. Geological characteristics and safety study of the inkstone slate deposit in Shexian County, southern Anhui Province [J]. *East China Geology*, 41(1): 36~44 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chuantian, Ren Mingjun, Qin Wei, et al. 2021. Study on mineral spectral characteristics of ink stone slate in Shexian County, southern Anhui Province [J]. *East China Geology*, 42(3): 286~292 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hui, Cong Peizhang, Yang Bin, et al. 2016. Analysis on lithochemistry and mineralization mechanism in Hedong gold deposit, northwest Jiaodong [J]. *Gold*, (4): 13~18 (in Chinese with English abstract).
- Wang Junhu. 2010. The “Gua Fu Hu Li” of She inkstone [J]. *Oriental Collection*, (1): 54~56 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xinhua, Lou Fasheng and Liu Chungen. 2005. The division and the contrast of Middle Proterozoic Xikou rocks group in the boundary of Anhui, Zhejiang, Jiangxi Provinces [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 26(2): 86~96 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Huayun, Wu Xueyi, Zhu Jianming, et al. 1999. Simulating experiments on migration of SiO₂ in phyllite in the process of ductile shearing as exemplified by Jinshan gold deposit [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 19(3): 343~348.
- Xu Shengfa, Zhu Qiang, Hu Shaoqi, et al. 2017. Petrogeochemical features of neoproterozoic Xikou group complex in south Anhui and their structural implications [J]. *Geology of Anhui*, 27(1): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chunxia, Wang Xiaowei, Tang Qingyan, et al. 2010. Geological features and genesis of Taoyan in Lama cliff, Zhuoni county, Gansu Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 24(4): 343~347 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Fujun, Pan Jiayong, Xu You, et al. 2017. Mineral chemistry of

- biotites and chlorites from Huangsha uranium mining area in the middle Nangling Range: Constraints on petrogenesis and uranium mineralization [J]. Geological Journal of China Universities, 23 (4): 575~590 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ying and Chen Tao. 2008. Study on gemmological and mineralogical characteristics of She inkstone [J]. Journal of Gems & Gemmology, 10(3): 12~15 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhe, Wang Yonglong and Yang Zhen. 1988. Theory on self-sharpening edge and ink-making of China's She inkstone [J]. Chinese Science Bulletin, 33(17): 1 330~1 332 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈志强, 何小青, 卢友任, 等. 2011. 端砚微量元素地球化学特征研究 [J]. 地球化学, 40(4): 387~391.
- 程金华, 马冬. 2013. 绩溪县洪坑板岩砚石矿的岩性、成分、物理化学性能特征分析 [J]. 安徽地质, 23(2): 108~111, 115.
- 方韶. 2012. 穗砚的历史演变 [J]. 合肥工业大学学报(社会科学版), 26(5): 85~87.
- 洪杰, 吴正庭. 2012. 穗砚产业可持续发展探索 [J]. 安徽科技, 283(9): 27~28.
- 韩露, 阳珊, 朱江, 等. 2017. 穗砚石金星金晕纹饰特点及其成因分析 [J]. 安徽地质, 27(4): 317~320.
- 胡鹏, 陈能松, 徐先兵, 等. 2014. 赣皖交界婺源地区中生代花岗岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 地质科技情报, 33(4): 24~30.
- 胡鹏浩, 费业泰, 安成祥. 1999. 穗砚抛光机理研究 [J]. 中国机械工程, 10(7): 736~738.
- 胡中泰. 2003. 穗砚的鉴别和欣赏 [M]. 武汉: 湖北美术出版社, 1~73.
- 李刚, 王时麒. 2016. 山东临朐红丝砚石的发墨机理探讨 [J]. 岩石矿物学杂志, 35(S1): 175~181.
- 李志群. 2000. 中国南方砚石的品质研究 [J]. 中国矿业, 9(2): 12~15.
- 廖圣兵, 张彦杰, 周效华, 等. 2014. 皖赣相邻地区溪口岩群沉积序列及沉积环境分析 [J]. 矿产与地质, 28(6): 660~667.
- 刘演良. 2002. 端砚的鉴别和欣赏 [M]. 武汉: 湖北美术出版社, 1~75.
- 刘志斌. 2009. 穗砚在砚史发展中的历史概况及地位 [J]. 艺术生活, (4): 69~71.
- 芦建文, 韩倩. 2018. 江西婺源地区中元古代变质岩研究 [J]. 四川有色金属, (2): 31~35.
- 卢友任, 陈志强, 喻亨祥, 等. 2011. 端砚的宝石学特征及其仿制品鉴别 [J]. 桂林理工大学学报, 31(2): 198~201.
- 马荣生. 2002. 皖南前南华纪岩石地层 [J]. 华东地质, 23(2): 94~106.
- 潘华华. 2008. 浅析穗砚的鉴赏方法与评价标准 [J]. 上饶师范学院学报, 28(6): 89~93.
- 秦宏宇, 徐强, 曹妙聪. 2014. 吉林松花砚石产状及矿物学特征研究 [J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 15(4): 96~98.
- 任明军, 周俊兰, 秦伟, 等. 2019. 皖南歙县砚石板岩赋矿层位地质特征及找矿方向: 以双河口砚石矿床为例 [J]. 安徽地质, 29(1): 22~29.
- 任明军, 周俊兰, 秦伟, 等. 2020. 皖南歙县砚石板岩矿床地质特征及安全性研究 [J]. 华东地质, 41(1): 36~44.
- 王传田, 任明军, 秦伟, 等. 2021. 安徽歙县龙潭砚石板岩矿物谱学特征研究 [J]. 华东地质, 42(3): 286~292.
- 王慧, 丛培章, 杨斌, 等. 2016. 胶西北河东金矿床岩石化学特征与成矿机理分析 [J]. 黄金, (4): 13~18.
- 王俊虎. 2010. 穗砚的“瓜肤縠理” [J]. 东方收藏, (1): 54~56.
- 吴新华, 楼法生, 刘春根. 2005. 皖浙赣相邻区中元古代溪口岩群的划分与对比 [J]. 资源调查与环境, 26(2): 86~96.
- 肖化云, 吴学益, 朱建明, 等. 1999. 韧性剪切作用下千枚岩中 SiO_2 的迁移模拟实验——以金山金矿为例 [J]. 矿物学报, 19(3): 343~348.
- 徐生发, 朱强, 胡召齐, 等. 2017. 皖南新元古代溪口岩群岩石地球化学特征及其构造意义 [J]. 安徽地质, 27(1): 1~6.
- 杨春霞, 王晓伟, 汤庆艳, 等. 2010. 甘肃卓尼喇嘛崖洮砚地质特征及成因 [J]. 矿产与地质, 24(4): 343~347.
- 钟福军, 潘家永, 许幼, 等. 2017. 南岭中段黄沙铺矿区黑云母与绿泥石的矿物化学特征及其对成岩成矿的约束 [J]. 高校地质学报, 23(4): 575~590.
- 张莹, 陈涛. 2008. 穗砚的宝石矿物学特征研究 [J]. 宝石和宝石学杂志, 10(3): 12~15.
- 郑辙, 汪永龙, 杨震. 1988. 中国穗砚的自磨刃发墨理论 [J]. 科学通报, 33(17): 1 330~1 332.