

天然翡翠的高温高压改性探索*

陈政洁¹, 周礼¹, 郑伟¹, 张佳威², 贺端威¹

(1. 四川大学原子与分子物理研究所, 四川 成都 610065

2. 宁波东方理工大学, 浙江 宁波 315201)

摘要: 以主矿物相为硬玉的低品质天然翡翠为原料, 采用六面顶压机开展高温高压改性探索, 分别尝试了“硬玉稳定区内直接高温高压处理”和“低压亚稳区熔融—淬火制备玻璃前驱体—高压稳定区晶化”2种路径, 分析了包裹材料、压力、温度和保温时间对 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃前驱体形成及晶化行为的影响。结果表明, 前者未能明显改善样品的透明度和颜色均一性, 显微组织亦未见明显致密化趋势; 后者中, 无包裹、Mo 及 Re 包裹均可形成透明、无气泡的优质玻璃前驱体, 其中 Re 包裹样品的整体效果最好; Ta 包裹样品晶化后主相为 NaTaO_3 。以 Re 包裹玻璃前驱体的晶化实验表明, 较高温度有利于样品整体晶化, 延长保温时间可进一步促进样品由边缘向内部晶化并逐步形成纤维交织状显微组织。本研究结果表明, 相比于在硬玉稳定区内直接进行高温高压处理, 经玻璃前驱体重构后再高压晶化的路径表现出更大的改性潜力。

关键词: 天然翡翠; 高压晶化; 高温高压改性; $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃; 包裹材料

中图分类号: O521.2

文献标志码: A

翡翠是以硬玉 ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$) 为主要矿物组分的多晶集合体, 具有较高的观赏与应用价值。天然高品质翡翠的形成条件苛刻且资源十分稀缺, 因此围绕其人工合成与改性利用的研究持续受到关注^[1-3]。人工合成翡翠的研究起步较早。自 20 世纪 50 年代以来, 关于硬玉温度—压力稳定关系的实验研究逐步展开。Robertson 等通过高温高压实验研究了硬玉在 1.0—2.5 GPa 压力条件下的稳定条件, 表明硬玉属于典型的高压稳定矿物^[4]。此后, Bell 和 Roseboom 等进一步研究了硬玉与相关铝硅酸盐体系的相平衡关系, 为高温高压条件下人工制备硬玉质材料提供了重要的理论基础^[5-6]。1984 年, 美国通用电气公司 (GE) 报道了高温高压条件下宝石级翡翠的合成结果, 说明人工制备翡翠质材料在实验上是可行的, 但相关工艺细节并未公开^[7-8]。此后, 国内外学者围绕翡翠的高温高压合成开展了较多研究, 并在块体样品制备、致色调控、晶化规律及交织结构形成等方面取得了重要进展^[9-15]。 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃及熔体体系在高压条件下的结构、热力学及扩散性质已得到一定研究, 这为从“熔融—淬火—晶化”角度研究翡翠原料改性提供了重要参考^[16,17]。总体来看, 人工合成翡翠研究的关键已由“能否合成硬玉相”逐步转向“如何获得组织均匀、完整性好且性能稳定的翡翠质材料”。

现有人工合成翡翠工艺多采用“化学配料制备玻璃前驱体—高温高压晶化”的两步路线。通常先按硬玉化学组成配制原料, 经高温熔融—淬火制备具有 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 组成的非晶质玻璃前驱体, 再在高温高压条件下进行脱玻化 (晶化) 处理, 使之转变为晶态硬玉^[18,19]。前驱体的均匀性和纯净性是影响后续高温高压晶化效果的重要因素。然而, 该方法存在配料过程复杂、易引入杂质、合成周期长等问题, 且所得玻璃前驱体中气泡难以完全消除, 进而使最终产物在透明度、颜色均一性及显微结构致密性等方面仍难以与天然高品质翡翠相媲美^[12,20]。

*收稿日期: 2026-04-01; 修回日期: 2026-04-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFA1406200)

作者简介: 陈政洁 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事高压科学研究。E-mail: 2023226060041@stu.scu.edu.cn

通讯作者: 贺端威 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事高压物理、大腔体静高压技术、超硬材料研究。E-mail: duanweihe@scu.edu.cn

近年来, 高温高压处理技术已在钻石改性领域展现出独特优势。例如, 前期关于化学气相沉积 (CVD) 金刚石高温高压改性的研究表明, 高温高压后处理能够通过缺陷修复与组织调控显著改善其光学性能, 使样品由不透明提升至接近完全透明^[21]。与金刚石类似, 翡翠 (硬玉) 作为自然界中的高压形成矿物, 可在常压或低压条件下长期稳定地以亚稳态保存, 高温高压处理有望成为天然翡翠改性探索的一种有效手段。考虑到高品质翡翠资源日益稀缺, 而低品质天然翡翠储量丰富、价格低廉, 若能通过高温高压处理实现其品质提升, 将具有重要的科学意义与应用价值。已有研究中, 吴钰等人以翡翠边角料为起始原料开展高温高压合成实验探索, 合成出的翡翠结构与天然翡翠仍存在较大差异^[22]。因此, 目前无论是对低品质天然翡翠直接进行高温高压处理以探索其改性可能性, 还是以天然翡翠为原料制备 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃前驱体并实现其高压相稳定区下的硬玉相晶化转变, 公开报道相对有限。

基于此, 本研究以主矿物相为硬玉的低品质天然翡翠为原料, 采用六面顶压机开展高温高压改性探索。首先, 在硬玉相稳定区内对天然翡翠直接施加高温高压处理, 考察其外观、物相组成及显微组织变化, 以评估该路径的改性效果; 随后, 采用“低压亚稳区熔融—淬火制备玻璃前驱体—高压稳定区晶化”路径, 系统研究包裹材料、压力、温度和保温时间对 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃前驱体形成与晶化行为的影响, 并比较两种实验路径在天然翡翠结构重构与组织优化方面的差异, 以期为天然翡翠的高温高压改性探索及后续工艺优化提供实验依据。

1 实验

1.1 原料、实验装置与表征方法

本实验以产自缅甸的天然翡翠为原料。经阿基米德法测得其密度约为 $3.31 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 位于文献报道的天然翡翠典型密度范围 ($3.20\text{—}3.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 之内^[23]。如图 1(a)所示, 将天然翡翠加工为直径 7.5 mm、高 2.5 mm 的圆片, 样品外观呈浅绿色至灰白色, 微透明至不透明, 颗粒感明显, 属于品质较低的天然翡翠。如图 1(b)所示, XRD 数据表明初始样品以硬玉相为主, 未见明显杂相峰, 可作为后续高温高压改性及熔融—淬火实验研究的起始原料。样品组装剖面示意图如图 1(c)所示。

实验前, 将组装块置于 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘烤 2—6 h, 以去除表面吸附水分。随后在国产铰链式 DS 6×14 MN 六面顶压机上开展高温高压实验。实验温度采用 WRe5 - WRe26 热电偶测量, 本文未对压力引起的热电偶电动势变化进行校正。实验组装内部压力采用固定点法进行标定, 并结合标 A 组装条件下银熔点法建立的油压—腔体压力关系进行校准, 具体标定方法详见文献^[24,25]。实验过程中, 首先在室温下将样品腔加压至设定压力, 再以 $100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至目标温度, 各实验条件下均采用相同升温程序。加热结束后, 样品在高压腔体中被快速淬火至室温, 再卸压至常压^[26]。对初始样品及经研磨抛光去除表面包裹材料后的回收样品, 采用丹东方圆 DX-2700 型 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 仪分析物相组成, 测试条件为: 扫描范围为 $10^\circ\text{—}70^\circ$, 步进角度为 0.03° , 采样时间为 1 s, 管电压为 40 kV, 管电流为 30 mA。利用 JSM-IT500HR 型场发射扫描电子显微镜 (field emission scanning electron microscope, FESEM) 观察样品断面微观形貌。拉曼光谱测试采用 532 nm 固态激光器 (RGB Nova Pro) 作为激发光源, 测试功率为 70 mW, 激光光斑大小约 $5 \mu\text{m}$; 共聚焦拉曼光谱系统采用成像光谱仪 (Andor SR-303i-B) 与电子增益 EMCCD (Andor DU970P-BVF), 全息光栅光谱分辨率为 0.5 cm^{-1} , 单次积分时间 3 s, 累计采集 20 次。

1.2 低品质天然翡翠在硬玉相稳定区内的直接高温高压处理

为探索低品质天然翡翠在硬玉稳定区内直接进行高温高压处理的改性可能性, 依据硬玉高压相稳定区范围^[6], 并结合本课题组前期实验基础, 选取 5 GPa 作为代表性实验压力, 温度范围设定为 $1000\text{—}1200 \text{ }^\circ\text{C}$, 可覆盖 5 GPa 条件下 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃向硬玉晶化的特征温区。各实验条件下保温时间均为 1 h, 以考察处理后样品的外观、物相组成及显微组织变化。

1.3 天然翡翠玻璃前驱体的制备及硬玉相稳定区高压晶化

本实验分为两个阶段。第一阶段，为考察包裹材料对 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃前驱体形成的影响，在 3 GPa、1600 °C 条件下对天然翡翠样品保温 3 min 进行熔融—淬火处理，分别比较无包裹（与六方氮化硼-hBN 直接接触）以及使用纯度为 99.98%、厚度为 0.05 mm 的钽 (Ta)、钼 (Mo) 以及铼 (Re) 片进行包裹所得样品的外观形貌和断面特征。第二阶段，选取 Re 包裹制得的玻璃前驱体作为起始物，在 5 GPa 条件下进一步研究温度 (1000 °C、1100 °C) 和保温时间 (0.5—10 h) 对其晶化行为及微观结构演化的影响。需要指出的是，部分长时间保温样品在回收后可见局部轻微形貌变化，但整体轮廓仍基本保持。

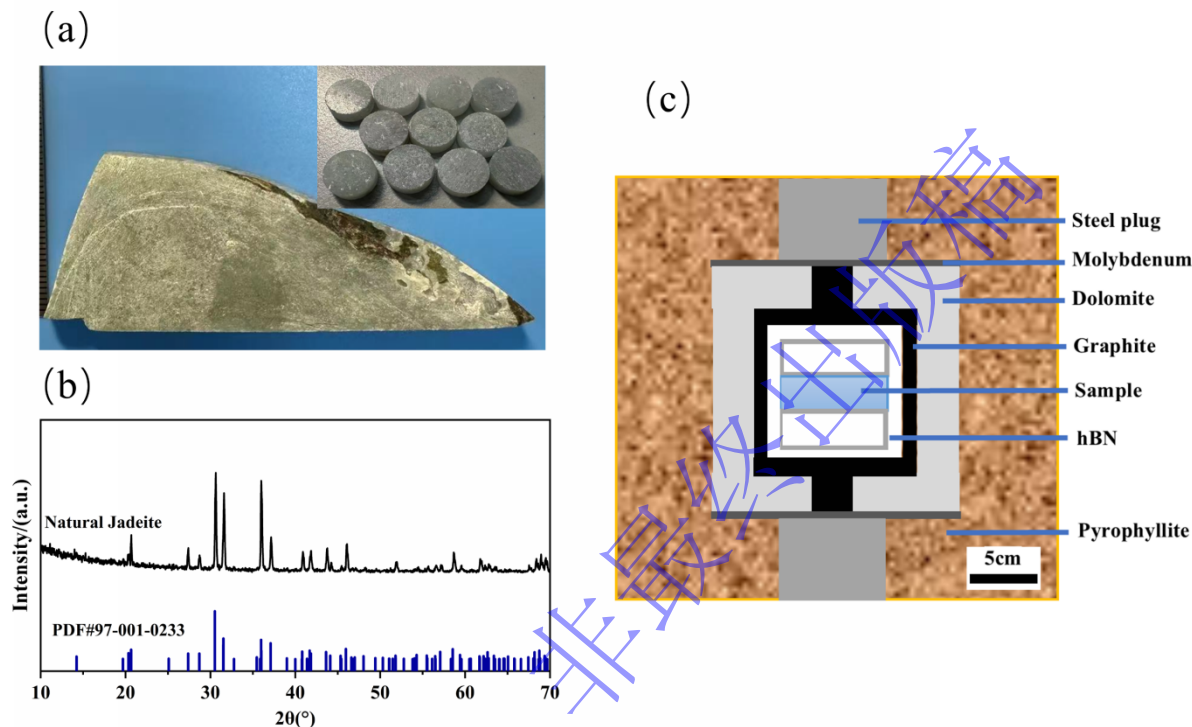


图 1 (a) 天然翡翠原料及其加工后的圆片样品照片, (b) 初始样品的 XRD 图谱, (c) 实验组装剖面示意图

Fig. 1 (a) Photographs of the natural jadeite raw material and the machined disk specimens;
(b) XRD pattern of the starting material; (c) cross-sectional schematic of the experimental assembly

2 结果与讨论

2.1 天然翡翠在硬玉稳定区内高温高压处理后的外观、物相组成与显微形貌

在 5 GPa、1000—1200 °C 的条件下经保温 1 h 处理后，样品的光学照片、SEM 断面形貌及 XRD 图谱见图 2。从外观上看，经高温高压处理后的样品整体仍呈低透明状态，颜色分布亦未见明显均一化，说明天然翡翠的外观品质在该高温高压处理条件下并未得到明显改善。XRD 结果表明，经 1000、1100 和 1200 °C 处理后的样品，其主要衍射峰位置总体均与天然翡翠参考谱较好对应，仍以硬玉相特征峰 (PDF 97-001-0233) 为主，未见明显宽弥散非晶峰或新的主导杂质相特征峰。不同温度处理后样品在个别峰的相对强度和峰形上存在一定差异，表明高温高压处理对样品微观组织状态产生了一定影响。需要说明的是，同一块天然翡翠样品不同部位在局部峰强上可能存在一定差异，但未见可明确归属于独立杂质相的额外特征峰。本文后续处理前后图谱比较统一采用同一条代表性初始样品 XRD 曲线作为天然翡翠参考谱。SEM 观察表明，未经处理的天然翡翠样品整体结构较致密，主要由板片状晶体组成，断口呈典型台阶状解理形貌，并表现出一定的局部定向排列特征。相比之下，经高温高压处理后，样品的显微组织均出现明显调整。如图 2(b)–(d) 所示，1000 °C 保温处

理后样品主要表现为不规则片状和块状晶体相互搭接形成的重排集合体，边界趋于钝化，晶体排列较为松散，局部定向排列特征减弱。随着处理温度的升高，片层结构出现进一步重组、长大及粗化趋势，但整体上未见向更加细腻、致密和均匀的交织状显微组织演化。

从珠宝学角度看，翡翠的“种”“水”不仅与矿物组成有关，还与内部组织的细腻程度、均匀性及缺陷发育状况密切相关。一般而言，若样品内部仍存在较明显的结构不均一、颗粒粗化或解理相关散射界面，则不利于透明度提升及细腻质感的形成。需要说明的是，本文仅基于宏观外观和显微组织变化，对与“种”“水”相关的结构表现进行了初步定性讨论，尚未开展系统宝石学定量评价。综合光学照片、XRD 及 SEM 结果可知，在硬玉相稳定区内直接对低品质天然翡翠施加高温高压处理，未引起主相改变，虽然其显微组织在处理后的观测到了一定程度的重构，但宏观透明度和颜色均一性未见明显改善，显微组织亦未向更细腻、均匀的交织状结构演化，因此，从宝石学品质角度看，在不经历整体熔融—晶化过程的条件下，单纯依靠稳定区内高温高压处理难以实现低品质天然翡翠的有效改性。基于此，本研究进一步采用“低压亚稳区熔融—淬火制备玻璃前驱体—高压稳定区晶化”的实验路径，以期通过对天然翡翠进行更充分的结构重构，进一步探索其改性的可能性。

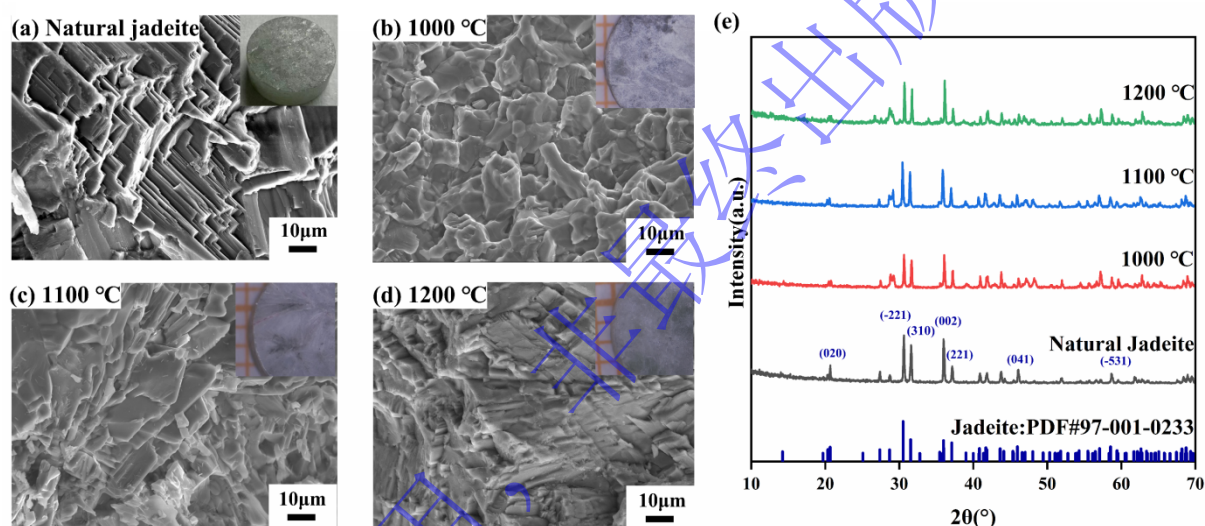


图 2 天然翡翠及其在 5 GPa 条件下经不同温度处理 1 h 后样品的光学照片、SEM 断面形貌和 XRD 图谱。(a) 天然翡翠；(b)–(d) 分别为经 1000、1100 和 1200 °C 处理后的样品，(e) 天然翡翠参考谱及各处理样品的 XRD 图谱

Fig. 2 Optical photographs, SEM fracture morphologies, and XRD patterns of natural jadeite and the samples treated at 5 GPa for 1 h at different temperatures. (a) Natural jadeite; (b)–(d) samples treated at 1000, 1100, and 1200 °C, respectively; (e) XRD patterns of the reference natural jadeite sample and the treated samples.

2.2 包裹材料对天然翡翠玻璃前驱体形成的影响

为进一步探索低品质天然翡翠高温高压改性的可行路径，本研究采用“低压亚稳区熔融—淬火玻璃化—高压稳定区晶化”路线开展后续研究。首先在位于 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 低压相区的 3 GPa、1600 °C 的条件下对天然翡翠进行熔融—淬火处理，所得样品的光学照片和 SEM 断面形貌见图 3。结果表明，无包裹、Mo 包裹和 Re 包裹样品经熔融—淬火后均可获得透明无气泡的 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃前驱体，密度约为 $2.60 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。相比之下，Re 包裹样品在降温卸压后整体形态保持较好，去除包裹层后仍可回收出较完整块体，未见明显整体塌陷或严重变形，仅边缘局部存在轻微不规则。而 Ta 包裹样品则呈现紫色不透明特征，推测这可能与 Ta 参与反应后形成含 Ta 反应产物及相关结构缺陷有关；同时，样品中大量气泡还可能增强光散射，从而进一步降低其透明度并影响样品外观。SEM 结果进一步显示，无包裹、Mo 包裹和 Re 包裹样品断面均较为平整光滑，表现为典型脆性断裂特征，且未观察到气泡存在；而 Ta 包裹样品断面存在大量气泡，不利于前驱体所期望的致密化和均匀化，

也可能对后续高压晶化过程造成干扰。这一现象提示 Ta 在本实验条件下可能与样品或周围环境发生了反应，该判断也与其后续晶化产物转变为 NaTaO_3 的结果相一致。

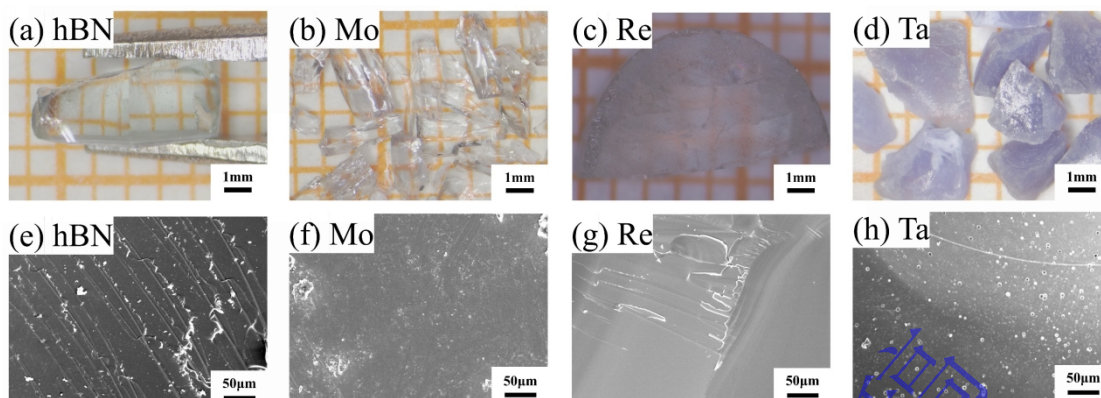


图 3 在 3 GPa、1600 °C 条件下，采用不同包裹材料制备样品的光学照片（上）和 SEM 断面形貌（下）

Fig. 3 Optical photographs (top) and SEM fracture morphologies (bottom) of samples obtained at 3 GPa and 1600 °C with different encapsulation materials

为进一步探究不同包裹材料所得玻璃前驱体的晶化行为，将上述样品在位于 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 高压（硬玉）相区的 5 GPa、1200 °C 条件下保温 30 min，所得产物的 XRD 图谱如图 4 所示。无包裹、Mo 包裹及 Re 包裹样品的晶化产物均与天然翡翠的特征峰一致，未见明显杂相，表明这三类样品在后续高温高压处理中均可沿 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 高压相体系晶化，实现由低压低密度玻璃态向高压高密度硬玉相的转变。而 Ta 包裹样品高压晶化后主要转变为 NaTaO_3 ，在相同条件下未获得硬玉相产物，说明 Ta 并非本实验条件下的理想惰性包裹材料。综合前驱体形成状态、块体完整性及高压晶化产物相组成，Re 包裹条件下样品整体表现最佳，因此选其作为后续高压晶化行为研究的包裹材料。

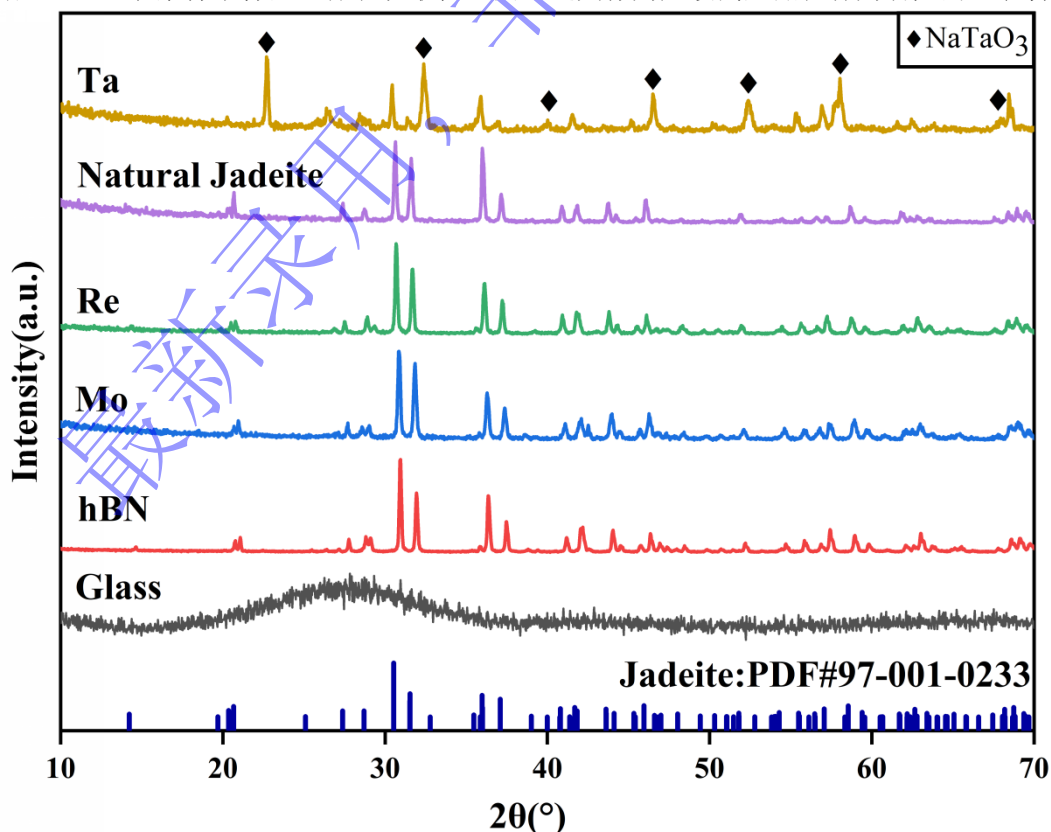


图4 天然翡翠样品、Re 包裹玻璃前驱体及不同包裹条件下制备的玻璃前驱体
在 5 GPa、1200 °C保温 30 min 后所得晶化产物的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of the natural jadeite sample, the Re-wrapped glass precursor, and the crystallized products obtained from glass precursors prepared under different encapsulation conditions after treatment at 5 GPa and 1200 °C for 30 min

2.3 温度和保温时间对 Re 包裹玻璃前驱体高压晶化行为的影响

基于上述结果，选取 Re 包裹制备的 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃前驱体作为起始物，在 5 GPa 条件下考察了温度和保温时间对其晶化行为的影响。如图 5(c)所示，在 1000 °C保温 0.5 h 后，样品仅边缘区域发生晶化，中心区域仍以非晶为主；相比之下，在 1100 °C保温 0.5 h 后，如图 5(f)所示，样品大部分区域已完成晶化，仅中心残留少量非晶区。说明升高处理温度有利于 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃前驱体向硬玉相转变。

鉴于样品的晶化行为呈现出明显的“由边缘至中心”的空间非均匀性，本研究主要结合 Raman 和 SEM 对样品的局部晶化行为进行分析。首先对图 5 中的典型区域进行了 Raman 表征，结果见图 6(a)。两种温度下样品边缘晶化区的 Raman 谱均与天然翡翠特征峰基本一致，其中 371 cm^{-1} 和 705 cm^{-1} 附近峰位清晰可见，表明样品边缘区域已经形成硬玉晶相；而中心残留区域则主要表现为宽峰特征，缺少晶态硬玉的尖锐特征峰，说明其仍以非晶态为主^[4,27]。该结果与外观形貌观察一致，进一步证实样品晶化程度对温度较为敏感，并呈现出由边缘向内部推进的空间分布特征。

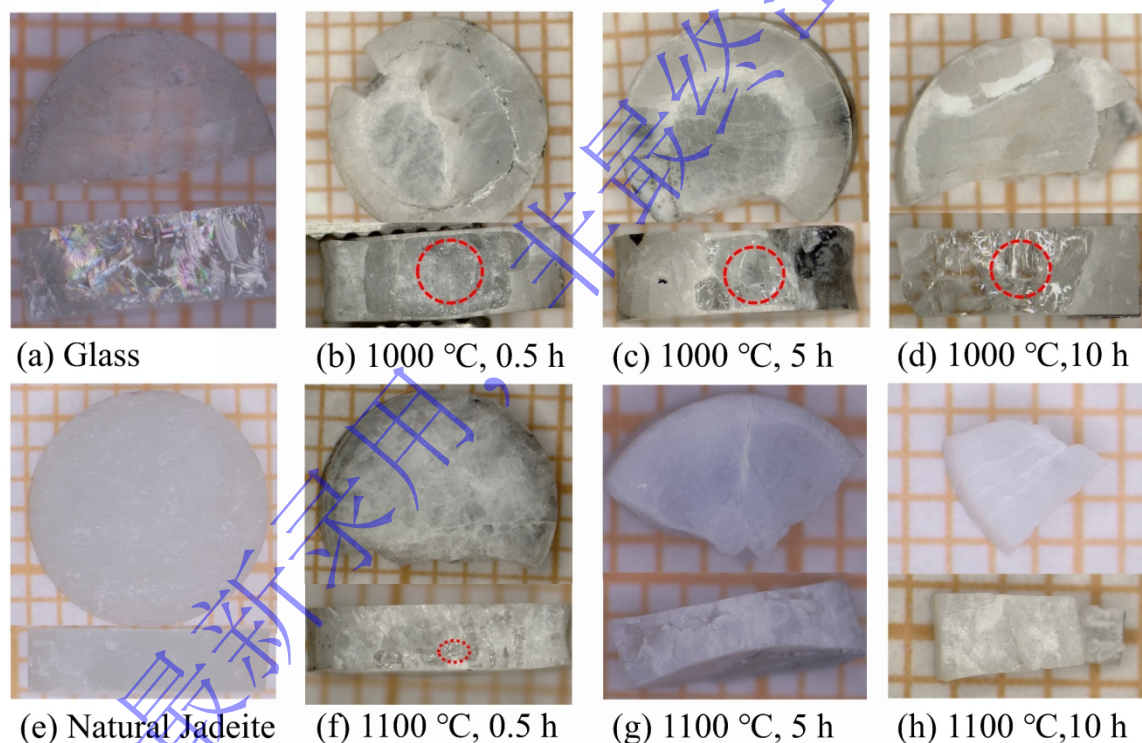


图5 天然翡翠样品、Re 包裹玻璃前驱体及其在 5 GPa 条件下经不同温度和保温时间处理后样品的光学照片
红色虚线圈标示样品中心残余非晶区

Fig. 5 Optical photographs of the natural jadeite sample, the Re-wrapped glass precursor, and the samples treated at 5 GPa under different temperatures and holding times.

The red dashed circles indicate the residual amorphous region in the central part of the sample.

通过比较不同保温时间下的样品形貌可见，保温时间对晶化进程的影响同样受温度制约。如图 5(b)–(d)所示，在 1000 °C条件下，即使将保温时间延长至 10 h，样品仍保持“边缘晶化、内部非晶”的特征，在该温度下晶化动力学明显受限，单纯延长保温时间难以实现样品的整体晶化。相比之下，如图 5(f)–(h)所示，在 1100 °C条件下，样品在仅保温 0.5 h 时已基本晶化；当保温时间延长

至 5 h 和 10 h 后, 中心残余非晶区完全消失。图 6(b)显示, 在 5 GPa、1100 °C 条件下, 随着保温时间由 0.5 h 延长至 5 h 和 10 h, 样品的 Raman 谱逐渐接近天然翡翠特征谱, 硬玉特征峰逐步清晰。结合光学照片和 SEM 结果可知, 在 1100 °C 条件下延长保温时间有利于样品晶化的持续进行, 使其由早期局部晶化状态进一步向硬玉相更充分发育的组织状态演化。

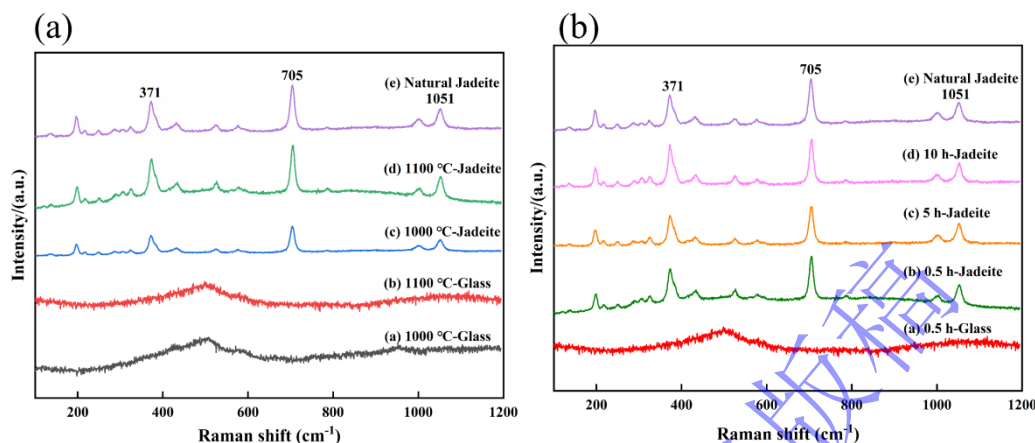


图 6 在 5 GPa 条件下所得样品的 Raman 光谱: (a) 不同温度处理后样品边缘晶化区与中心残留区的 Raman 光谱, (b) 1100 °C 条件下经不同保温时间处理后样品的 Raman 光谱

Fig. 6 Raman spectra of samples obtained at 5 GPa: (a) Raman spectra of the crystallized rim and the residual central region of samples treated at different temperatures; (b) Raman spectra of samples treated at 1100 °C for different holding times

为进一步揭示经 1100 °C 条件下不同保温时间处理后样品的显微组织差异, 对其断面进行了 SEM 观察, 结果如图 7 所示。如图 7(a) 所示样品残余非晶区的断面形貌整体平整光滑, 未见明确晶体形貌, 表明该区域仍保留残余非晶特征; 与此同时, 如图 7(b) 所示已晶化区域开始出现片状、短柱状晶体, 但其发育程度有限, 排列较为杂乱。随着保温时间延长至 5 h, 如图 7(c) 所示, 可观察到大量细长柱状至纤维状晶体, 且晶体数量明显增加, 形成了较明显的束状和交织状显微组织, 这说明样品晶化程度已明显提高。保温时间进一步延长至 10 h 后, 如图 7(d) 所示, 晶体束进一步发育后, 交织特征更加明显, 局部区域可见较粗大的晶体集合体穿插于细小晶束之间, 样品中晶体生长更加充分。综合来看, 在 5 GPa、1100 °C 条件下, 延长保温时间有利于 NaAlSi₂O₆ 玻璃前驱体的持续晶化, 并促进显微组织由局部晶化逐步向纤维交织结构演化。样品的晶化过程总体表现出由边缘向内部推进的特征, 可能与边界区域优先成核及样品内部热场分布差异等因素有关, 但其具体机制仍有待进一步研究。从珠宝学角度看, 结晶颗粒的尺寸及其分布均匀性同样会影响翡翠品质表现。残余玻璃、气泡、裂隙及显著的组织不均一性通常会增强光散射, 不利于翡翠“水头”的表现; 相较于晶粒粗大、分布不均或伴随较多残余非晶和缺陷的组织, 较细小且较均匀发育的纤维交织状显微结构通常更有利于形成细腻、致密的结构基础。结合本文结果, 经由玻璃前驱体重构后再高压晶化的路径能够在更大程度上实现天然翡翠原始结构的重构, 在组织演化层面较直接稳定区内处理表现出更大的改性潜力。

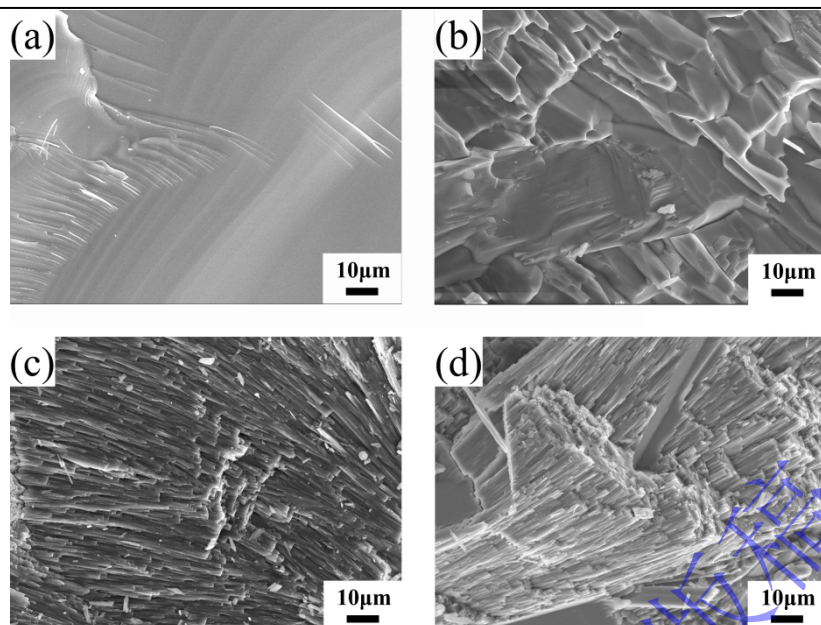


图 7 在 5 GPa、1100 °C 条件下经不同保温时间处理后样品的 SEM 断面形貌: (a) 保温 0.5 h 后样品的残余非晶区, (b) 保温 0.5 h 后样品的晶化区, (c) 保温 5 h 后样品的断面形貌, (d) 保温 10 h 后样品的断面形貌
Fig. 7 SEM fracture morphologies of samples obtained at 5 GPa and 1100 °C with different holding times:
(a) residual amorphous region of the sample held for 0.5 h; (b) crystallized region of the sample held for 0.5 h;
(c) fracture morphology of sample held for 5 h; (d) fracture morphology of sample held for 10 h

3 结论

本研究以主矿物相为硬玉的低品质天然翡翠为原料, 采用六面顶压机开展了高温高压改性探索实验, 分别尝试了在硬玉稳定区内直接进行高温高压处理和“低压亚稳区熔融—淬火制备玻璃前驱体—高压稳定区晶化”两种实验路径, 以及包裹材料、压力、温度和保温时间对 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃前驱体制备和晶化行为的影响, 得到以下结论:

(1) 在 5 GPa、1000—1200 °C 条件下直接对低品质天然翡翠进行高温高压处理时, 样品主相仍保持为硬玉相, 宏观透明度和颜色均一性未见明显改善, 表明在本研究实验条件下该路径难以实现低品质天然翡翠的有效改性。

(2) 在 3 GPa、1600 °C 条件下, 无包裹、Mo 包裹和 Re 包裹样品均可形成透明无气泡的优质低压相 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃前驱体, 其中 Re 包裹样品块体完整性最好; Ta 包裹样品则形成异常产物, 晶化后主要转变为 NaTaO_3 , 表明 Re 更适合作为本实验条件下的包裹材料。

(3) Re 包裹 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 玻璃前驱体在 5 GPa 条件下可重新晶化为硬玉相, 其晶化行为受温度和保温时间显著影响; 1100 °C 较 1000 °C 更有利于样品完成整体晶化, 延长保温时间可进一步促进样品由边缘向内部晶化并逐步形成交织状显微组织。

总体来看, 相较于在硬玉稳定区内直接进行高温高压处理, 经玻璃前驱体重构后再高压晶化的路径表现出更大的改性潜力。

参考文献

- [1] 欧阳柳章, 何飞, 邢莹莹. 人工合成翡翠研究进展[J]. 人工晶体学报, 2022, 51(3): 559-570.
OUYANG L Z, HE F, XING Y Y. Synthesis of jadeite: review and perspective[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2022, 51(3): 559-570.
- [2] 谢艳, 于思清, 杜高翔. 合成翡翠理论与研究进展述评[J]. 中国宝石, 2021, 2: 90-93.

- XIE Y, YU S Q, DU G X. A review on the theoretical basis and research progress of synthetic jadeite[J]. *China Gems*, 2021, 2: 90-93.
- [3] 郭颖,熊宁,宋功保,等.翡翠成因与人工合成的研究[J].西南工学院学报, 2000, 15(2): 46-49.
GUO Y, XIONG N, SONG G B, et al. Research of the occurrence and synthesis of Burma jadeite[J]. *Journal of Southwest Institute of Technology*, 2000, 15(2): 46-49.
- [4] ROBERTSON E C, BIRCH A F, MACDONALD G J F. Experimental determination of jadeite stability relations to 25 000 bars[J]. *American Journal of Science*, 1957, 255(2): 115-137.
- [5] BELL P M, ROSEBOOM E H Jr. Melting relationships of jadeite and albite to 45 kilobars with comments on melting diagrams of binary systems at high pressures[J]. *Mineralogical Society of America Special Paper*, 1969, 2: 151-161.
- [6] NEWTON M S, KENNEDY G C. Jadeite, analcite, nepheline, and albite at high temperatures and pressures[J]. *American Journal of Science*, 1968, 266(9): 728-735.
- [7] DEVRIES R C, FLEISCHER J F. Synthesis of jadeite for jewelry[C]//Materials Research Society Symposium Proceedings. Amsterdam: North-Holland Publishing, 1984: 203-208.
- [8] NASSAU K, SHIGLEY J E. A study of the General Electric synthetic jadeite[J]. *Gems & Gemology*, 1987, 23(1): 27-35.
- [9] WANG F B, LI Y, CHEN N, et al. Synthesis and characterization of NaAlSi₂O₆ jadeite under high pressure and high temperature[J]. *Modern Physics Letters B*, 2014, 28(22): 1450175.
- [10] 朱成明,金志升,蔡恩照,等.人工合成宝石级翡翠的研究[J].矿物学报, 1997, 17(3): 245-249.
ZHU C M, JIN Z S, CAI E Z, et al. A study on jadeite synthesis[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1997, 17(3): 245-249.
- [11] 胡艺,贺端威,胡启威,等.人工翡翠的高温高压合成及表征[J].高压物理学报, 2015, 29(4): 241-247.
HU Y, HE D W, HU Q W, et al. Synthesis and characterization of jadeite-jade under high pressure and high temperature[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2015, 29(4): 241-247.
- [12] 杜雁春,贺端威,胡艺,等.高压合成翡翠微结构的研究[J].高压物理学报, 2016, 30(6): 441-447.
DU Y C, HE D W, HU Y, et al. Microstructure of jadeite jade synthesized under high pressure[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(6): 441-447.
- [13] 邢睿睿,陈美华,邹昱.晶化时间对高压高温合成翡翠品质的影响[J].宝石和宝石学杂志, 2019, 21(1): 31-39.
XING R R, CHEN M H, ZOU Y. Crystallization time on quality of synthetic jadeite under high pressure and high temperature[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 2019, 21(1): 31-39.
- [14] LI G, WANG J, LI Y D, et al. Synthesis and characterization of NaAlSi₂O₆ jadeite under 3.5 GPa[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(6): 068202.
- [15] XU M, JING Z C, VAN ORMAN J A, et al. Density of NaAlSi₂O₆ melt at high pressure and temperature measured by in-situ X-ray microtomography[J]. *Minerals*, 2020, 10(2): 161.
- [16] SAKAMAKI T, WANG Y B, PARK C Y, et al. Structure of jadeite melt at high pressures up to 4.9 GPa[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(11): 112623.
- [17] NI H W, DE KOKER N. Thermodynamics, diffusion and structure of NaAlSi₂O₆ liquid at mantle conditions: A first-principles molecular dynamics investigation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B9): B09202.
- [18] 赵廷河,阎学伟,崔硕景,等.宝石翡翠的合成、热行为和热稳定性的研究[J].高压物理学报, 1992, 6(4): 291-296.
ZHAO T H, YAN X W, CUI S J, et al. Crystal growth of synthetic jadeite for jewelry[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1992, 6(4): 291-296.
- [19] 赵廷河,崔硕景,阎学伟.钠铝辉石由非晶态到晶态的转化研究[J].物理化学学报, 1994, 10(7): 604-

- 609.
- ZHAO T H, CUI S J, YAN X W. Crystallization of clinopyroxene $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ from glass[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 1994, 10(7): 604-609.
- [20] 杨晔,陈美华,隗澎,等.高温高压合成翡翠的溶胶-凝胶法粉料制备的工艺方法探索[J].*宝石和宝石学杂志*, 2012, 14(2): 13-18.
- YANG Y, CHEN M H, WEI P, et al. A study on sol-gel technique of HTHP synthetic jadeite[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 2012, 14(2): 13-18.
- [21] ZHENG L P, WANG J P, LI Q, et al. High pressure and high temperature treatment of chemical vapor deposited polycrystalline diamond: from opaque to transparent[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(8): 3096-3103.
- [22] 吴钰,沈才卿,陆太进.翡翠边角料进行高温高压合成翡翠实验探索[C]//*中国国际珠宝首饰学术交流会论文集*.北京, 2017: 163-167.
- WU Y, SHEN C Q, LU T J. Synthetic jadeite grown by high temperature high pressure experiment using natural jadeite offcut materials[C]//*Proceedings of China International Jewelry Academic Conference*. Beijing, 2017: 163-167.
- [23] HARGETT D. Jadeite of Guatemala: A contemporary view[J]. *Gems & Gemology*, 1990, 26(2): 134-141.
- [24] WANG J P, HE D W, LI X, et al. The melting curve of cobalt under high pressure[J]. *Solid State Communications*, 2020, 307: 113805.
- [25] LIANG A K, LIU Y J, LIANG H, et al. Thermal insulation performance of monoclinic ZrO_2 and cubic ZrO_2 -CaO solid solution under high pressure and high temperature[J]. *High Pressure Research*, 2018, 38(4): 458-467.
- [26] HE D W, ZHANG F X, ZHANG M, et al. Quenching with rapid decompression: a new method for rapid solidification[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(26): 3811-3813.
- [27] SHARMA S K, VIRGO D, MYSEN B O. Raman study of the coordination of aluminum in jadeite melts as a function of pressure[J]. *American Mineralogist*, 1979, 64(7-8): 779-787.

Exploratory Study on the High-Temperature and High-Pressure Modification of Natural Jadeite Jade

CHEN Zhengjie¹, ZHOU Li¹, ZHENG Wei¹, ZHANG Jiawei², HE Duanwei¹

(1. *Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China*

2. *Eastern Institute of Technology, Ningbo 315201, Zhejiang, China*)

Abstract: This study used low-quality natural jadeite jade, with jadeite as its principal mineral phase, as the starting material and carried out exploratory high-temperature and high-pressure modification experiments with a cubic-anvil press. Two processing routes were investigated: direct high-temperature/high-pressure treatment within the jadeite stability field, and a route involving melting-quenching in the low-pressure metastable region to prepare a glass precursor followed by crystallization in the high-pressure stability field. The effects of encapsulation material, pressure, temperature, and holding time on the formation and crystallization behavior of the $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ glass precursor were systematically examined. The results show that the former route did not significantly improve the transparency or color uniformity of the samples, nor did it produce obvious densification of the microstructure. In contrast, in the latter route, high-quality transparent and bubble-free glass precursors were obtained without encapsulation and with Mo or Re

encapsulation, among which the Re-encapsulated sample showed the best overall performance. For the Ta-encapsulated sample, the main phase after crystallization was NaTaO_3 . Crystallization experiments using the Re-encapsulated glass precursor further indicate that higher temperature is more favorable for overall crystallization, while prolonged holding time promotes crystallization from the rim toward the interior and gradually leads to the formation of a fibrous interwoven microstructure. These results demonstrate that, compared with direct high-temperature/high-pressure treatment within the jadeite stability field, the route involving structural reconstruction through a glass precursor followed by high-pressure crystallization exhibits greater potential for modification.

Keywords: natural jadeite jade; high-pressure crystallization; high-temperature and high-pressure modification; $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ glass; encapsulation materials

最新录用，
非最终出版稿