缅甸帕敢地区硬玉岩中流体包裹体

施光海① 崔文元① 王长秋① 张文淮②

(①北京大学地质学系，北京 100871；②中国地质大学资源学院，武汉 430074. Email: Shiguanghai@263.net.cn)

摘要 大量的气-液二相、气-液-固三相的包裹体发现于缅甸帕敢硬玉岩中，用激光 Raman 光谱仪分析的结果显示其气相和液相的成分为 H_2O + CH_4，固相部分成分为硬玉，表明该硬玉岩形成于含 H_2O + CH_4 的、组成近硬玉的熔体，该熔体可能来源于上地幔．根据实验岩石学资料推测硬玉岩形成温度大于 650℃，压力大于 1.5 GPa．

关键词 缅甸 硬玉 流体包裹体 硬玉质熔体 地幔

由硬玉组成的硬玉岩在世界上仅发现于缅甸西北部帕敢硬玉岩带(包括 Longking 和 Tawmaw)[1]、日本的 Kotaki[2]和 Oosa-cho 地区[3]、美国加州 San Benito[4]，俄罗斯的 Polar Urals 和 Pay-Yer 地块[5]、哈萨克斯坦 Near-Balkash 北部地区[6]以及危地马拉的 Motagua 断裂两边[7]. 这些硬玉岩的共同特点是：呈脉状、构造块状、透镜状或扁豆状产于蛇纹岩中，其周围出现蓝片岩，形成的大地构造环境与俯冲或碰撞有关．

上述产地的硬玉岩中，缅甸帕敢硬玉岩的商业价值最高，但它的研究程度很低，其成因目前仍无定论．本次研究中，我们在硬玉岩的残斑硬玉晶体内发现了大量多种类型的气-液二相包裹体和气-固-液三相包裹体．结合有关的实验岩石学资料，对该硬玉岩的成因作了探讨．

1 地质概况

印度板块自 71 Ma 以来大规模向北俯冲，50 Ma 时与欧亚板块发生碰撞，同时叠加逆时针方向旋转[8~10]，而且现在仍在向北俯冲[11]，在印度板块东部形成了巨大而又复杂的剪切滑脱断裂带. 帕敢硬玉岩脉位于印度板块东部造山带的北部，中心位置是北纬 25°36′ 91″，东经 96°18′ 63″，主要北东向不连续分布．硬玉岩脉产于赋存有块状或星点状铬铁矿体的蛇纹岩化橄榄岩体中，围岩主要为含多硅白云母、蓝闪石与冻蓝闪石的石英片岩，其次是含石榴斜长角闪岩、含黑硬绿泥石石英岩、含透辉石大理岩等．在硬玉岩脉与蛇纹岩化橄榄岩体之间，分布有由多种钠质或钠钙质角闪石组成的角闪岩.

帕敢硬玉岩中硬玉的含量一般大于 80%，其中硬玉端元组分可达 90%，其他矿物为钠铬辉石、铬硬玉、绿辉石及多种钠质或钠钙质闪石等．大部分硬玉颗粒出现细粒化-亚颗粒化，部分已超糜棱化[12]．但在细粒硬玉岩中仍含有少量的硬玉残斑晶，为孤立晶体或多个颗粒组成团块状集合体.

2 岩相特征及流体包裹体产状

研究样品为包有团块状硬玉残斑的细粒硬玉岩，残斑硬玉团块与细粒硬玉岩的边界在手标本上不明显，但在显微镜下十分清楚．残斑硬玉呈柱状或短柱状(长为 2~20 mm)，自形程度较高，残斑硬玉晶体之间平直接触(图版Ⅰ-1，附本刊后，下同)，反映斑晶硬玉在结晶时的结晶条件较为稳定．斑晶硬玉被定为残斑，依据是斑晶硬玉外侧受到明显挤压和剪切，造成晶体外部发生不同程度的裂开、拉断甚至破碎(图版Ⅰ-2).

电子探针分析结果(表 1)表明，残斑硬玉端元组分(Jd)均大于 99%，细粒硬玉岩中为 96.74%，前者较后者略高.

表 1 残斑及细粒硬玉的成分(%)[a)]

样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	MnO	Na_2O	Tot	Jd
D31	58.86	0.03	24.70	0.02	0.18	0.24	0	15.30	99.34	99.12
D32	59.01	0.09	25.21	0.26	0.25	0.16	0	15.38	100.36	99.10
D33	58.82	0.01	25.09	0.12	0	0	0.13	15.05	99.22	99.82
D34	58.62	0	23.68	0	0.51	0.70	0.02	15.15	98.65	96.74

a) 由北京大学地质学系电子探针室舒桂明高级工程师测定，测试仪器为 EPM-810Q；其中 D31, D32 和 D33 为自形硬玉，在其内发现有大量的流体包裹体, D34 为细粒化-糜棱化硬玉

在残斑硬玉中，发现有大量的流体包裹体(图版Ⅰ中 3~6). 流体包裹体只出现在残斑硬玉晶体内，而在细粒硬玉及被破碎的残斑硬玉碎片内没有发现，这可能是由于残斑具有良好的保存条件. 按照流体包裹体中的相数，将流体包裹体分为 2 类：a 类，固-气-液三相包裹体；b 类，气-液二相包裹体. 按包裹体的大小可将 b 类进一步细分为 2 个亚类，即：b1 亚类，大于 3 μm 气-液二相包裹体；b2 亚类. 小于或等于 3 μm 的包裹体. 它们的特征如下：

a 类：是体积最大的一类包裹体，大小为 6 μm×8 μm~10 μm × 15 μm，占包裹体总数的 5% 左右. 形状为规则的短柱状负晶形到不规则形状，$V_{固}/V_{气-液}$之值为 2~3. 固相部分有多个颗粒，无色~略带浅绿色，属硅酸盐类子矿物. 气液相中 $V_{气}/V_{液}$之值为 0.05~0.2，部分气泡被压扁，无色~略带黄色. 该类包裹体均为原生类，可能是在硬玉结晶时被捕获.

b1 亚类：体积仅次于 a 类包裹体，大小多为 3 μm×4 μm~5 μm × 7 μm，略带黄色~浅黄棕色，占包裹体总数的 30%左右，$V_{气}/V_{液}$为 0.1~0.3. 形状多为短柱状负晶形，部分为卵圆形，延长方向平行于硬玉 *c* 轴. 该类包裹体均为原生包裹体，可能是在硬玉结晶时被捕获.

b2 亚类：是体积最小，数量最多的一类包裹体，占包裹体总数的 60%以上，为黄色~深黄棕色. 形状多为卵圆形，偶尔也可见针管状包裹体，主要为气-液二相包裹体，单一相包裹体约占 30%(由于太小难以辨别是液相还是气相). 这类包裹体密集出现的地方，a 类和 b1 亚类包裹体较少出现. 该类包裹体绝大多数为原生包裹体，只有极少一部分可能为次生包裹体.

3 测试方法与结果

流体包裹体的成分测定用 Renishaw 公司的 Renishaw-1000 激光 Raman 仪，测试条件为：Ar^+激光器，激光波长 514.5 nm，激光功率 5 mW，物镜 50 倍.

a 类包裹体：对三相包裹体进行激光 Raman 扫描(区间为 1 250~4 500 cm^{-1})，检测出气-液相成分主要为水(摩尔含量约占 95%)，其次是 CH_4(摩尔含量约占 5%). 子矿物经过反复测试后确定为硬玉矿物. 为了避免寄主矿物硬玉对子矿物测试结果的干扰，对不同深度的包裹体分别进行测试，并着重挑选子矿物近薄片表面进行测试，直到结果最后被确认无误为止. a 类包裹体的主要组成为 Jd-H_2O，并有少量的 CH_4(图 1 和 2)，均一后为含水的硬玉质的硅酸盐熔体，反映硬玉岩结晶时存在含水的组成近于硬玉的熔体.

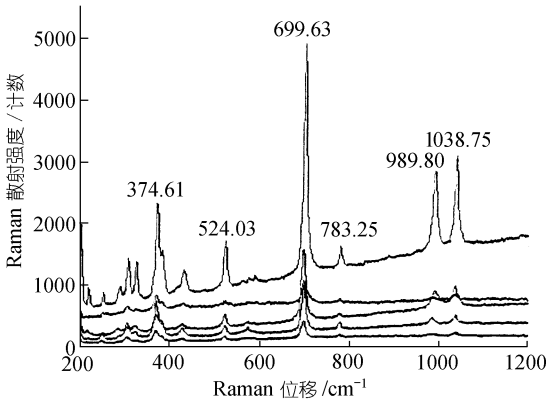


图 1　a 类流体包裹体(6 个)固相部分的 Raman 光谱图
固相部分的解释结果都为硬玉矿物

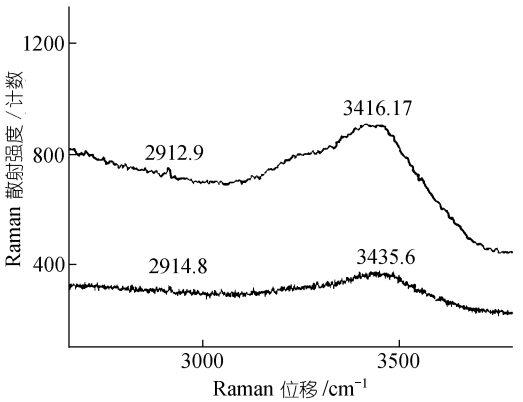


图 2　a 类流体包裹体(2 个)气-液相的 Raman 光谱
解译结果为水与甲烷，其中 CH_4 占 5%, H_2O 为 95%

b1 亚类的包裹体：测试条件同 a 类中气-液部分，根据 Raman 散射峰确定包裹体的成分为 H_2O 与 CH_4，其中摩尔含量比 H_2O ∶ CH_4 为 60 ∶ 40(图 3). 没有发现 CO_2 及 N_2 等成分的 Raman 散射峰.

b2 亚类包裹体：由于包裹体很小，拉曼散射峰的信噪比较小，故在取峰时迭加多次以确保出现清楚的 Raman 散射峰. Raman 散射峰解译为甲烷(图 4)，此外在样品中只发现有一个样品具较弱的水的 Raman 散射峰，这一结果表明：b2 亚类流体包裹体中的成分主要为甲烷(摩尔含量约占 95%), H_2O 的含量极少(摩尔含量约占 5%).

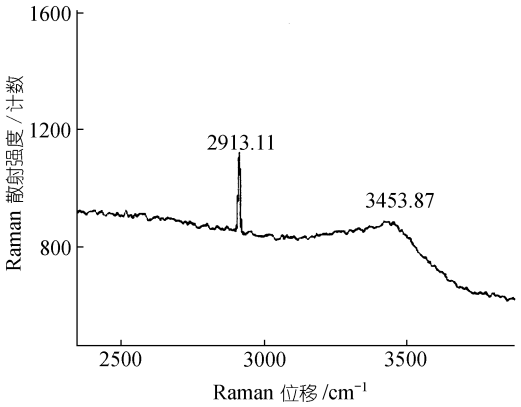


图 3　b1 类流体包裹体的 Raman 光谱图
解译结果为水与甲烷，其中 CH_4 占 40%, H_2O 为 60%(摩尔比)

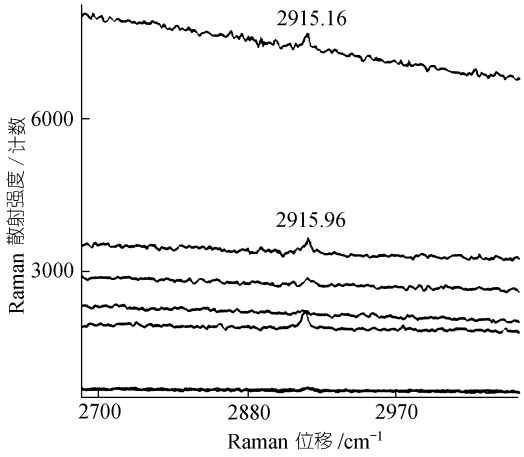


图 4　b2 类流体包裹体的 Raman 光谱图
解译结果为甲烷

综上所述，残斑硬玉中的流体包裹体的组成结果为含 H_2O 和 CH_4 及子矿物硬玉.

4　讨论

(1) 此前尚未见大量的气-液二相和气-固-液三相包裹体群发现在缅甸硬玉中的报道. 本文结果对于揭示缅甸硬玉岩的成因、碱质熔浆的形成、演化过程等方面有较为重要的意义.

(2) 由于在残斑硬玉存在含 H_2O-CH_4-Jd 的三相包裹体，我们认为自然界存在直接从熔体中结晶的硬玉. 多个包裹体中出现硬玉子矿物，这一现象绝非偶然，说明硬玉结晶时周围存在含 H_2O 和 CH_4 的硬玉质组成的硅酸盐熔体，也就是说本文研究的缅甸硬玉岩可能是在含 H_2O 和 CH_4 的硬玉质硅酸盐熔体中结晶而成. 此外，在缅甸硬玉岩中梳状硬玉条带和硬玉晶簇也被发现，说明在晚期存在更富挥发分的硬玉成分的硅酸盐熔体.

硬玉在变质岩石学尤其是在高压变质作用的领域中常被作为一种经典的低温高压的变质矿物[13, 14]. 世界上其他地区的硬玉岩已被认为属区域变质成因，由变质反应 $NaAlSi_3O_8$–$NaAlSi_2O_6 + SiO_2$ 或 $NaAlSiO_4 + NaAlSi_3O_8 = 2NaAlSi_2O_6$ 形成[5, 6, 15, 16]. 但用上述的观点较难解释硬玉中出现多相包裹体的现象，因此，成因上缅甸硬玉岩是特殊的.

(3) 实验资料表明：在一定的温压条件下，硬玉可直接从熔体中结晶，并且在无水与有水的条件下，温压条件的差别很大. 在无水的条件下，硬玉从硬玉质的硅酸盐熔体中结晶的条件为 T >1 250℃, P >2.5 GPa[17~19]. 合成细粒、致密、透明、祖母绿色的硬玉所需的条件为：T > 1 750℃, P >4.5 GPa[20, 21]；在有水的条件下，L = Jd + V 所需的是 P >1.5 GPa, T > 650℃[22, 23]，当温度压力低于此条件则形成钠长石与霞石. 包裹体的组成为甲烷-水-硬玉，与有水体系类似，而 L= Jd + V 反应的平衡相温压曲线与俯冲带内的地热梯度相近，所以，硬玉岩结晶于含水的熔体，所需条件在俯冲带不难实现.

(4) 压力大于 1.5 GPa，意味着深度大于 50 km，也就是说硬玉岩形成时的深度位于下地壳到上地幔. 在这种深度下，形成这种含水的硬玉成分的硅酸盐熔体可能性有 3 种：即(ⅰ) 壳源物质的重熔、超基性的分异来源于地幔. 由于缅甸硬玉岩产于蛇纹岩化的橄榄岩体中，且规模较大，故重熔的可能性较低，主要原因是缺少物源；从超基性岩浆中可以分异出碱硅质熔体，而且也有报道[24]，但很难分异出可形成缅甸硬玉岩的大规模的钠-硅-铝质熔体.

Gasparik[19]通过模拟地幔实验，认为在 300~400 km 处存在含碱辉石层，该层在橄榄岩层之下，并与之渐变过渡. 综合碱质在辉石与熔体中分配[25]、陆下与洋下橄榄岩中碱质辉石[26]的地幔模拟、地幔熔融[27]、俯冲带流体[28]、甲烷流体在 1 240℃，深度 100 km 深的大洋软流圈内可稳定存在[27, 29, 30]等方面的资料，含水和甲烷的硬玉成分的硅酸盐熔体来源于地幔是可能的.

致谢 在研究与撰写论文过程中得到刘树文副教授、濮玉梅高级工程师以及杨延勇、李红东和王敬博士的帮助，在此一并致谢. 本工作为教育部博士点科学研究基金(批准号: 97000151)资助项目.

参 考 文 献

1 Chhibber H L. The Mineral Resources of Burma (Myanmar). London: Macmillan, 1934. 320

2 Iwao S. Albitite and associated jadeite rock from Kotaki District, Japan: A study in ceramic raw material. Kawasaki: Report of Geological Surve of Japan, 1953. 153

3 Kobayashi S, Miyake H, Shoji T. A jadeite rock from Oosa-cho, Okayma Prefceture, Southwestern Japan. Min J, 1987, 13: 310~327

4 Coleman R G. Jadeite deposit of the Clear Creek area, New Idridistrict, San Benito County, California. Journal of Petrology, 1961, 2: 209~247

5 Morkovkine V F. Jadeitites in the hyperbasites of the Polar Urals. Izvestia Akademia Nauk SSSR, Series Geologia, 1960, 4: 103~108

6 Dobretsov N L, Ponomareva L G. Comparative characteristics of jadeite and associated rocks from Polar Ural and Near-Balkhash region. Academia Scientifica USSR, 1965, 31: 178~243

7 Mcbirney A R, Aoki K I, Bass M. Eclogite and jadeite from the Motagua Fault zone, Guatemala. Am Min, 1967, 52: 908~918

8 Molnor P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. Science, 1975, 189: 419~426

9 Patriat P, Achache J. India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates. Nature, 1984, 311: 615~621

10 Powell C M, Conaghan P J, Klootwijk C T. India-Eurasia collision chronology. Nature, 1985, 316: 86

11 Larson K M, Burgmann R, Bilham R, et al. Kinematics of the India-Eurasia collision zone from GPS measurements. J Geophys Res-Sol Ea, 1999, 104: 1077~1093

12 **崔文元, 王时麒, 杨富绪, 等. 缅甸翡翠(辉石玉)的矿物学及其分类的研究. 云南地质**, 1998, (3-4): 356~380

13 Coleman R G, Wang X. Ultrahigh Pressure Metamorphism. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 1~33

14 Miyashiro A. Metamorphic Petrology. London: UCL Press, 1994. 307~338

15 Radvanec M, Banno S, Ernst W G. Chemical microstructure of jadeite from Pacheco Pass, California. Am Min, 1998, 83: 273~279

16 Harlow G E. Jadeitites, albitites and related rocks from the Motagua fault zone, Guatemala. J Metam Geo, 1994, 12: 49~68

17 Bell P M, Roseboom E H. Melting relationships of jadeite and albite to 45 kilobars with comments on melting diagrams of binary system at high pressures. Min Soc Am, 1969, Spec Pap 2: 151~161

18 Litvin Y A, Gasparik T. Melting of jadeite to 16.5 GPa and melting relations on the enstatite-jadeite join. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57: 2033~2040

19 Gasparik T. Enstatite–jadeite join and its role in the Earth's mantle. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1992, 111: 283~298

20 Zhao T H, Yan X W, Cui S J, et al. The physical and chemical-properties of synthetic and natural jadeite for jewelry. Journal of Material Science, 1994, 29: 1514~1520

21 Zhao T H, Yan X W, Cui S J, et al. Synthesis of the clinopyroxenes join-$CaMgSi_2O_6$-$NaAlSi_2O_6$ for jewelry. Journal of Material Science, 1995, 30: 1117~1123

22 Boettcher A L, Wyllie P J. Phase relationships in the system $NaAlSiO_4$-SiO_2-H_2O to 35 kilobars pressure. Am J Sci, 1969, 267: 875~909

23 Boettcher A L, Wyllie P J. Jadeite stability measured in the presence of silicate liquids in the system $NaAlSiO_4$-SiO_2-H_2O. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1968, 32: 999~1012

24 Matsukage K, Jadeite A S. Albite and nepheline as inclusions in spinel of chromititefrom Hess Deep, equatorial Pacific: Their genesis and implications for serpentinite diapir formation. Contri Mineral Petrol, 1998, 131: 111~122

25 Blundy J D, Falloon T J, Wood B J, et al. Sodium partitioning between clinopyroxene and silicate melts. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 1995, 100: 15501~15515

26 Seyler M, Bonatti E. Na, Al^{IV} and Al^{VI} in clinopyroxenes of subcontinnental and suboceanic ridge peridotites: A clue to difference melting processes in the mantle? Earth and Planetary Science Letters, 1994, 122: 281~289

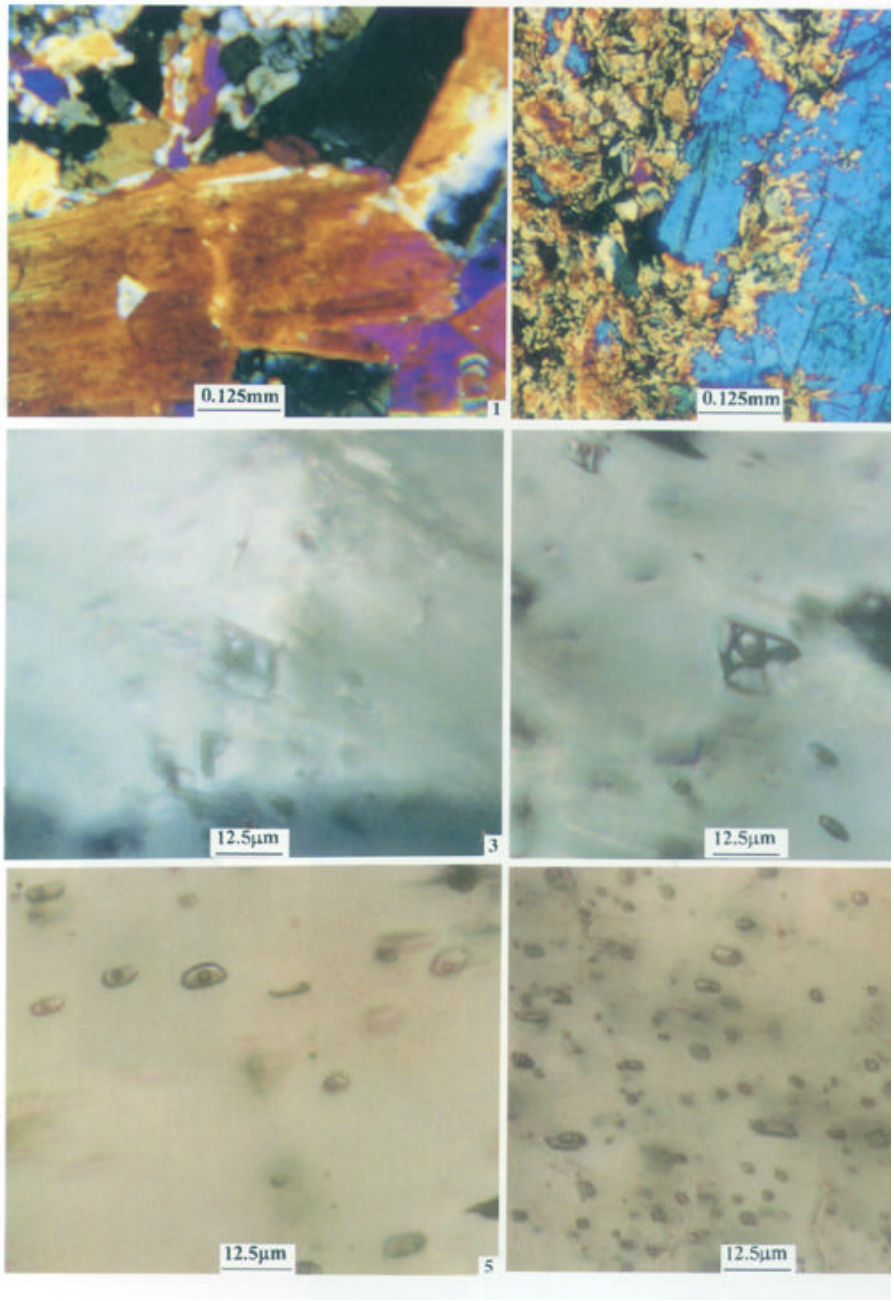
27 Green D H. Experimental definition of mantle melting and implications for mantle dynamics. Min Mag, 1994, 58: 350~355

28 Peacock S M. Fluid processes in subduction zones. Science, 1990, 248: 329~337

29 Giardini A, Melton C, Mitchell R. The nature of upper 400 km of the earth and its potential as the source for non-biogenic petroleum. J Petrol Geol, 1982, 5: 173~190

30 **苏 梨, 宋述光, 王志海. 北祈连山玉石沟地幔橄榄岩中富** CH_4 **流体包裹体及其意义. 科学通报**, 1999, 44(8): 855~858

(2000-01-07 **收稿**, 2000-04-13 **收修改稿**)



残斑硬玉岩中残斑硬玉及其内部包裹体特征

1. 残斑硬玉间相互呈柱粒状镶嵌结构,其边部为细粒化-糜棱化硬玉; 2.残斑硬玉的边部出现裂开、拉断、破碎; 3,4. 残斑硬玉中的三相包裹体; 5. 密集细小的 b2 包裹体群; 6. b1 类流体包裹体