

板峪口组大理岩中的变质流体

张翔钧

(中国地质科学院天津地质矿产研究所)

主题词: 板峪口组; 变质作用; 流体; 渗滤作用; 缓冲作用

提 要: 山西五台山区板峪口组大理岩的总体矿物组合为透闪石、金云母、白云石、方解石、微斜长石和石英, 岩石变质时受缓冲作用控制。口泉主沟内绿帘石脉体中流体的 X_{CO_2} 为0.08, 而围岩白云岩中 X_{CO_2} 大于0.4, 同一地点脉体和围岩中变质溶液具有不同的 X_{CO_2} 说明溶液成分受缓冲作用控制。绿帘石脉体内溶液成分保持 $X_{CO_2} = 0.8$ 不变则说明溶液成分受渗滤作用控制。围岩内矿物组合为金云母、透闪石、方解石和白云石也说明溶液成分受渗滤作用控制。总的说来, 本地区的变质溶液成分是缓冲作用加渗滤作用的综合结果。

本区变质时所通过的流体数量一般不超过岩石体积的1/4。当岩石内有单矿物脉体时, 脉体内所通过的流体数量较高。绿帘石脉体内所通过的流体大致相当于岩石体积(99%)。

在河北、山西两省交界处的五台山区和太行山区发育板峪口组地层。它主要由夹不纯大理岩的长石石英岩和变粒岩组成。山西区测队、李树勋、白瑾等将此套地层定为五台群最底部的一个组, 它不整合在龙泉关群之上(表1)^[1,2]。袁国屏认为所有板峪口组均属溱沱群

表 1 板峪口组地层对比

Table 1 The correlation of strata of Banyukou Formation

1:20万平型关幅 1967			李树勋, 冀树楷等 1986			白瑾等 1986		
下元古界	溱沱群	大石岭组 南台组 四集庄组	中元古界	溱沱群	大石岭组 南台组 四集庄组	早元古代	溱沱群	大石岭组 南台组 四集庄组
上 太 古 界	五 台 群	木格组	下 元 古 界	五 台 群	高凡亚群	晚 太 古 代	五 台 群	高凡亚群
		黑头崖段 车厂段			羊蹄沟组 大同沟组			羊蹄沟组 洪寺组
		辅上组			文溪组 芦咀头段			台怀亚群
		庄旺组		鸿门岩段 杨柏峪段 石佛段	石咀亚群			文溪组 庄旺组 金刚库组 板峪口组
石咀组	金刚库段 板峪口段	上太古群	石咀群					
中太古界	龙泉关群	榆树湾组		龙泉关群	榆树湾组	早中太古代	龙泉关群	榆树湾组

大石岭组^[3]。

两种意见之间的差别非常之大。地层归属的不同将影响对整个五台山地区的构造、地壳演化等一系列基本问题的讨论,因此板峪口组需要进一步深入研究。本文将详细探讨板峪口组大理岩变质过程中的流体。

一、渗滤作用与缓冲作用

板峪口组地层在繁峙县口泉到庄旺一带,厚189.5m。自上而下为^[2]:

1. 角闪黑云变粒岩,上部为长石石英岩夹黑云变粒岩,厚29.6m;
2. 黑云角闪变粒岩、金云透闪大理岩,厚37.5m;
3. 条带状浅粒岩,上部夹角闪黑云变粒岩,厚36.6m;
4. 黑云变粒岩,上部含透辉石并夹大理岩,厚36.5m;
5. 金云透闪大理岩夹薄层硅质岩,厚14.9m;
6. 微斜浅粒岩,向上变为白云母长石石英岩,顶部为条带状黑云角闪变粒岩,厚34.4m。

上述地层主要由三类岩石,即长石石英岩、变粒岩和不纯大理岩组成。在这三类岩石中,长石石英岩中由于缺乏对变质作用敏感的矿物,因而很难确切地决定其变质相。角闪黑云变粒岩明显属于角闪岩相。不纯大理岩中含有特征的容易变质的矿物。这些特征矿物的生成既决定于温度条件,又决定于压力和二氧化碳分压。后两者对碳酸盐岩中变质矿物的影响显著大于对其他岩类的影响。因此研究不纯大理岩的变质作用必须结合区域变质时的温度、压力和流体的分压情况来考虑。五台群石咀亚群变质时的温压值厘定后的结果为600°C, 600MPa。

岩石在变质过程中的流体成分决定于两个因素:1.外来流体的成分,2.变质反应所产生的流体成分。在不同的地区这两个因素所起的作用不同。在有些地区岩石中的流体成分由外来的流体成分决定(渗滤作用);在另一些地区流体成分由岩石中变质反应所产生的流体决定(缓冲作用)。现有研究表明,当流体成分受某个单独因素控制时,可以根据岩石中现有的变质矿物组合来确定它受哪个因素所控制。

对含石英、微斜长石的白云大理岩而言,假如流体成分由渗滤作用控制,岩石中随着变质温度的升高,首先微斜长石与白云石反应产生方解石和金云母。然后石英与白云石反应产生透闪石和方解石,上述六种矿物将不共生在一起。当流体由缓冲作用控制时,这些矿物可能共生在一起(表2)。

自然界的岩石中,变质作用中的流体成分往往同时受这两个因素控制。根据赖斯和菲利

表2 450-600°C, 600MPa时,不纯大理岩共生组合

Table 2 The mineral assemblages of impure dolostone at 450-600°C, 600MPa

组合 \ 流体条件	渗 滤 作 用		缓 冲 作 用
原 组 合	Do > Ksp, Qu	Qu > Do > Ksp	Do > Ksp, Qu 或 Qu > Do > Ksp
变 质 组 合	Do, Phl, Cc, Tr	Qu, Cc, Phl, Tr	Do, Phl, Cc, Qu, Ksp, Tr

(Rice and Ferry, 1982) 资料^[4]所进行的统计结果, 受缓冲作用控制的为28%, 受渗滤作用控制的为16%, 受两者共同控制的为56%。当岩石变质中流体成分受两者共同控制时, 它所产生的组合可能与渗滤作用时产生的相同, 也可能与缓冲作用时产生的相同。它决定于通过岩石流体数量的多少和化学反应引起流体成分变化的强烈程度。当流体数量大或流体成分变化强度低时, 所产生的矿物组合与渗滤作用时相同; 反之, 当通过的流体数量少或流体成分变化强度高时, 所产生的矿物组合与缓冲作用时相同。因此除了确定岩石中的矿物共生组合外, 必须对该地区的温压和地质发展史有所了解才能了解变质过程中的流体行为。

板峪口组大理岩的总体成分中有透闪石、金云母、白云石、方解石、微斜长石和石英。因而其总体共生组合处在不变点Ⅲ上(图1)。根据表2, 按板峪口组不纯大理岩的总体矿物共生组合, 岩石变质时属缓冲作用控制。

在小渠渠沟内大理岩的矿物共生组合为金云母、透闪石、方解石和白云石。在口泉主沟内大理岩的共生组合为金云母、透闪石、方解石和白云石(此外尚有斜长石)。在口泉主沟内大理岩中还有各种单矿物脉。在大理岩近中心部位有透闪石脉体。在大理岩边缘靠近黑云变粒岩处有绿帘石脉体。此脉体已经石香肠化, 说明脉体形成后还有过强烈的构造活动。此种透闪石脉和帘石脉在附近其他岩性地层中如变粒岩和长石石英岩中都没有发现, 因而进一步说明它们不是晚期的脉体, 而是不纯大理岩变质时的产物。根据表2, 这些组合说明岩石变质时属渗滤作用控制。对口泉主沟内的矿物共生组合进一步具体分析后表明它不纯属渗滤作用控制, 同时还有缓冲作用存在。

渗滤作用的流体通常是贫二氧化碳的水溶液。从图1可以看出, 在 X_{CO_2} 大时, 高于500℃, 帘石就变为方解石和钙长石。只有当 X_{CO_2} 很小时, 帘石不稳定的温度才高于600℃, 它才能在当地600℃条件下稳定。这说明帘石脉内通过的溶液是贫 CO_2 的, 而且在变质过程中没有什么显著变化, 保留了贫 CO_2 的特性。

帘石脉之旁的碳酸盐岩内, 方解石与钙长石共生而没有帘石, 并且也没有帘石变为其他矿物的迹象。这说明帘石脉旁大理石内溶液的 X_{CO_2} 至少是在图1的I点之右, 而不是在I点之左。因为I点之左方解石与斜长石会发生反应而产生帘石。从图1可知I点的位置在 X_{CO_2} 约等于0.3处。这说明碳酸盐岩变质时其中流体的 X_{CO_2} 大于0.3。

此外, 在 X_{CO_2} 小于0.4的情况下, 从图1可以看出, 如温度高于580℃, 岩石中金云母、方解石、石英会反应产生透闪石和钾长石。该地区的变质温度高于580℃, 而岩石中金云母、方解石和石英没有反应而产生钾长石。这说明变质时流体中 X_{CO_2} 要大于0.4。原先贫二氧化

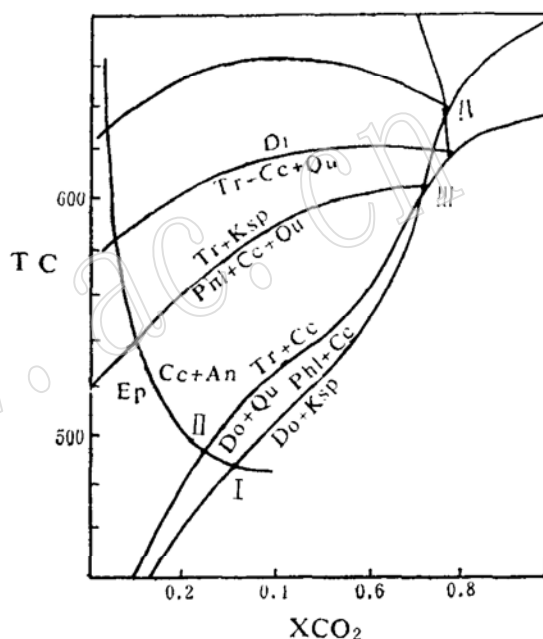


图1 总压600MPa下帘石—方解石—石英—钾长石— CO_2 — H_2O 之间反应的温度—流体成分相图(根据[4]图1, [5]图2综合而成)

Fig. 1 Temperature—fluid composition phase diagram for reactions within epidote—calcite—dolomite—quartz—K—feldspar— CO_2 — H_2O at a total pressure of 600MPa

碳的水溶液在反应过程中发生了成分变化, 逐步变得富 CO_2 。

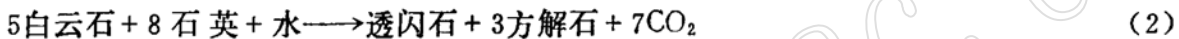
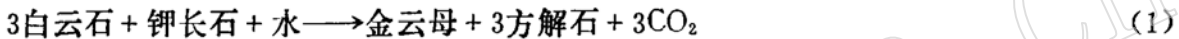
同一地点脉体和围岩中变质溶液具有不同的 X_{CO_2} , 这说明溶液成分不纯属渗滤作用控制。可以认为绿帘石脉体内溶液成分属透滤作用控制, 而围岩内溶液成分就受到缓冲作用的很大影响。本地区总体的溶液成分是一种典型的缓冲加渗滤作用的综合结果。

二、流体数量

现代研究工作表明, 参与变质反应的流体数量可以通过多种方法进行计算^[6]。本文中采用岩石的矿物含量计算化学反应法对不纯大理岩反应时流体数量进行计算。

1. 在小渠渠沟内不纯大理岩的矿物共生组合为金云母、透闪石、方解石和白云石。经镜下统计和差热分析结果, 各矿物含量分别为金云母10%, 透闪石8.5%, 方解石11%, 白云石70.5%。

岩石内矿物的反应式为:



根据有时不纯大理岩中尚有残留的石英和钾长石, 并且与大理岩共生的长石石英岩中主要矿物为石英和钾长石, 说明上述反应方程式是可靠的, 岩石中的金云母和透闪石都是变质作用的产物。

计算所得出的流体数量与假定的反应条件有关。为了由简至繁, 首先采用第一种方案计算。假定反应全部在 $X_{\text{CO}_2} = 0.7$ 条件下发生, 即发生在图1的Ⅲ点处。

Ⅲ点时平衡方程式为^[6]:

$$\frac{v_{ik}\xi_k}{n_T + \sum (v_{jk}\xi_k)} = X_i^f, \quad \xi = \frac{\Delta n_a}{v_a}$$

$$n_T = \frac{v_{ik}\xi_k}{X_i^f} - \sum_j (v_{jk}\xi_k) \quad (3)$$

式中 n_T 为进入反应的流体数量, 此处以纯水计算, 如水中含有二氧化碳, 则 n_T 的数量比纯水要大。 X_i^f 为反应终了时二氧化碳所占的比例。此处认为反应在Ⅲ点处发生, 反应过程中二氧化碳分压没有发生过变化, 因而 $X_i^f = 0.7$ 。 v_{ik} 代表二氧化碳在反应(1)、(2)中的系数, 它们分别为3和7。 ξ_k 代表反应(1)、(2)的指数, 它表示反应进行了多少单位摩, 它的值等于某矿物在反应中所产生的摩值除该矿物的系数。以 100cm^3 岩石计算, 小渠渠沟岩石中金云母的含量为: $100 \times 10\% = 10\text{cm}^3$, 金云母每摩体积为 149cm^3 , 因为 100cm^3 岩石中含 0.067 摩金云母, 这说明反应(1)产生了 0.067 摩金云母, 反应(1)的指数为 $0.067 \div 1 = 0.067$ 摩, $\xi_1 = 0.067$ 摩(mol)。同理 100cm^3 岩石中含有 8.5cm^3 透闪石, 透闪石每摩体积为 273cm^3 , 反应(2)产生了 0.031 摩透闪石, 反应(2)的指数为 0.031 摩。 v_{jk} 代表反应(1)、(2)中流体二氧化碳和水的系数。反应(1)中它们分别为3, -1, 反应(2)中它们分别为7, -1(正值代表反应中产生的该组分, 负值代表反应中消耗的该组分)。

将所有上述数值代入公式(3)得到:

$$n_T = \frac{3 \times 0.067 + 7 \times 0.031}{0.7} - (3 \times 0.067 + 7 \times 0.031 - 0.067 - 0.031)$$

$$= 0.597 - 0.32 = 0.277 \text{ mol}$$

在600℃, 600MPa时, 水的比重为0.8, 这些水的体积为 $V_{n_T} = 0.277 \times 18 \div 0.8 = 6.23 \text{ cm}^3$, 由此得出参加反应的水为6.23cm³, 约为岩石体积的6%。

在反应(1)与(2)中产生的方解石为10.9cm³ (0.294mol), 消耗的石英为4.2cm³ (0.284mol), 钾长石为7.3cm³ (0.067mol), 白云石为23cm³ (0.356mol)。矿物总消耗量为34.5cm³, 矿物总产量为29.4cm³。反应中岩石体积约收缩5%, 即产生了5%的空隙。反应前的原岩为含石英和钾长石的白云岩。

其次, 采用第二种方案计算。假定最初的流体为 $X_{\text{CO}_2} = 0.1$ 的流体, 产生金云母后流体中 $X_{\text{CO}_2} = 0.4$, 产生透闪石后最终的流体为 $X_{\text{CO}_2} = 0.7$, 即反应过程中流体成分不断有变化, 从原先的贫CO₂的水溶液变成最后的富CO₂的流体。此种假设可能更接近本区的实际情况。

流体总量计算公式为⁽⁶⁾:

$$n_T = \xi \frac{v_i - X_i^f (\sum_j v_j)}{X_i^f - X_i^o} \quad (4)$$

对产生金云母的反应

$$\xi = 0.067, \quad X_i^f = 0.4, \quad X_i^o = 0.1$$

$$v_{\text{CO}_2} = 3, \quad v_{\text{H}_2\text{O}} = -1$$

$$n_T = 0.067 \times \frac{3 - 0.4(3 - 1)}{0.4 - 0.1} = 0.067 \times \frac{3 - 0.8}{0.3} = 0.491 \text{ mol}$$

对产生透闪石的反应

$$\xi = 0.031, \quad X_i^f = 0.7, \quad X_i^o = 0.4$$

$$v_{\text{CO}_2} = 7, \quad v_{\text{H}_2\text{O}} = -1$$

$$n_T = 0.031 \times \frac{7 - 0.7(7 - 1)}{0.7 - 0.4} = 0.289 \text{ mol}$$

两个反应合在一起通过的流体数量为0.780mol相当17.55cm³。

虽然不同的方案计算出来的流体数量值有所差异, 分别为6.23cm³和17.55cm³。但总的相对100cm³岩石来说, 所占比例均不大。

2. 口泉地区板峪口组大理岩的总体平均成分大体为方解石23%, 白云石49%, 金云母10%, 透闪石16%, 钾长石2%, 石英微量⁽¹⁾。

反应(1)的指数为0.067mol, 反应(2)的指数为0.059mol。

按第一方案计算

$$n_T = \frac{3 \times 0.067 + 7 \times 0.059}{0.7} - (2 \times 0.067 + 6 \times 0.059) = 0.389 \text{ mol}$$

$$V_{n_T} = 0.389 \times 18 \div 0.8 = 8.75 \text{ cm}^3$$

由此得出通过大理岩的流体占岩石体积8.75%。

反应中产生的方解石为 14cm^3 ，消耗的钾长石为 10cm^3 ，石英为 8cm^3 。可见原岩为不纯白云大理岩，其中约含10%的钾长石，8%的石英，9%的方解石，其余为白云石。

按第二方案计算

产生金云母的反应

$$n_T = 0.067 \times \frac{3 - 0.4(3 - 1)}{0.4 - 0.1} = 0.491 \text{ mol}$$

产生透闪石的反应

$$n_T = 0.059 \times \frac{7 - 0.7(7 - 1)}{0.7 - 0.4} = 0.551 \text{ mol}$$

两个反应一起所通过的流体数量为 1.042mol ，相当 23.445cm^3 。

3. 口泉主沟内大理岩含金云母5%，透闪石23%，方解石13%，石英45%，斜长石14%。

按第一方案在 100cm^3 岩石内反应(1)产生的金云母为 5cm^3 ，相应为 0.0335mol ，反应(1)的指数为 0.0335mol 。反应(2)产生的透闪石为 23cm^3 ，相应为 0.0842mol ，反应(2)的指数为 0.0842mol 。将上述数字代入方程式(3)

$$n_T = \frac{3 \times 0.0335 + 7 \times 0.0842}{0.7} - (2 \times 0.0335 + 6 \times 0.0842) = 0.4133\text{mol}$$

$$V n_T = 0.4133 \times 18 + 0.8 = 9.30\text{cm}^3$$

通过 100cm^3 岩石的流体体积为 9.30cm^3 ，为岩石体积的9.30%。

按第二方案计算

产生金云母的反应

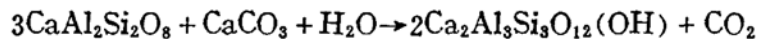
$$n_T = 0.0335 \times \frac{3 - 0.4(3 - 1)}{0.4 - 0.1} = 0.246 \text{ mol}$$

产生透闪石的反应

$$n_T = 0.0842 \times \frac{7 - 0.7(7 - 1)}{0.7 - 0.4} = 0.786 \text{ mol}$$

两个反应一起通过流体的数量为 1.032mol ，相当 23.22cm^3 。

4. 在口泉主沟内碳酸盐岩内靠近黑云变粒岩处有几厘米宽的帘石脉。根据方解石和钙长石反应可产生帘石，其反应方程式为：



在 600°C ， 500MPa 时该反应的平衡点为 $X_{\text{CO}_2} = 0.08^{(5)}$ 。由于缺少 600°C ， 600MPa 时的资料，我们暂以 $X_{\text{CO}_2} = 0.08$ 作为代用值。

$$n_T = \frac{v_i \xi}{X_i^f} - \sum_j (v_j \xi)$$

此处 $X_i^f = 0.8$ ， $v_{\text{CO}_2} = 1$ ， $v_{\text{H}_2\text{O}} = -1$ ， 100cm^3 帘石相当 0.705mol ， $\xi = 0.705 + 2 = 0.352$

$$n_T = \frac{0.352}{0.08} - (0.352 - 0.352) = 4.4 \text{ mol}$$

$$V n_T = 4.4 \times 18 + 0.8 = 99\text{cm}^3$$

由此得出帘石脉内所通过的流体体积大体相等于岩石体积(99%)。帘石脉为流体非常活跃的地点。

5. 在口泉主沟内还存在透闪石脉。

100cm³透闪石等于0.366mol。ξ = 0.366。

如将脉体看作完全独立的, 则X⁰_{CO₂} = 0.1, X^f_{CO₂} = 0.7。根据反应方程式(2), v_{CO₂} = 7, v_{H₂O} = -1。将以上数值代入公式(4)

$$n_T = 0.366 \times \frac{7 - 0.7(7 - 1)}{0.7 - 0.1} = 1.708 \text{ mol}$$

$$Vn_T = 1.708 \times 18 + 0.8 = 38.43 \text{ cm}^3$$

考虑到围岩中透闪石反应是从X_{CO₂} = 0.4开始, 假如把脉体与围岩作为一个整体来看, 那么脉体中的透闪石很可能也是从X_{CO₂} = 0.4才开始形成, 那么X⁰_{CO₂} = 0.4。其他数值仍保持不变。将以上数值代入公式(4)

$$n_T = 3.416 \text{ mol}, Vn_T = 76.86 \text{ cm}^3$$

这样透闪石脉体内所通过的流体体积大体在38.43 - 76.86cm³之间, 占岩石体积的38.43 - 76.86%。

总结上述结果, 按第一方案计算, 本区板峪口组不纯大理岩变质时通过的流体数量通常在岩体体积的10%以下(表3)。按第二种方案计算, 变质时的流体数量也不超过25%的岩

表3 板峪口组不纯大理岩变质时通过的流体数量

Table 3 The fluid volume infiltrated through impure marble of Banyukou Formation during metamorphism

流体 体积 (cm ³)	地 点	小渠渠沟	板峪口组总体	口 泉 主 沟		
				基 质	帘 石 脉	闪 石 脉
I		6.23	8.75	9.30	99	
II		17.55	23.45	23.22		38.43—76.86

石体积。口泉主沟内碳酸盐岩内通过的流体数量相对较高, 而且有脉体发育, 这说明溶液容易在那儿通过。这与口泉主沟内碳酸盐岩正处于褶皱转折端有关。通常认为褶皱转折端裂隙较发育, 容易形成流体通道。上述数据与这一说法是相符的。脉体内通过的流体数量明显大于基质中的。这一事实也与以往的观点相符, 脉体是溶液的主要通道。

参 考 文 献

- [1] 李树勋等, 1986, 五台山区变质沉积铁矿地质, 吉林科学技术出版社, 1—299。
- [2] 白瑾主编, 1986, 五台山早前寒武纪地质, 天津科学技术出版社, 1—475。
- [3] 袁国屏, 1986, 五台山区“五台群板峪口组”的归属问题, 山西地质, 1—2, 176—135。
- [4] Rice, J. M. and Ferry, J. M., 1982, Buffering, infiltration, and the control of intensive variables during metamorphism, Reviews in Mineralogy, Vol. 10, Characterization of metamorphism through mineral equilibria, 263-326.
- [5] Allen, J. M. and Fawcett, J. J., 1982, Zoisite-anorthite-calcite stability relations in H₂O-CO₂,

fluids at 5000 bars; an experimental and SEM study, *Jour. Petrol.* Vol. 23-2, 215-239.

[6] Ferry, J. M., 1986, Reaction progress; a monitor of fluid-rock interactions during metamorphic and hydrothermal events, in: Walther, J. V. and Wood, B. J., (eds) Fluid-rock interactions during metamorphism, Springer Verlag, 60-88.

The Metamorphic Fluid in Marble of Banyukou Formation

Zhang Yijun

(Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS)

Key words: Banyukou Formation; metamorphism;
fluid; infiltration; buffering

Abstract

The metamorphism of marble of Banyukou Formation in Wutaishan region, Shanxi province, is controlled by buffering process according to its total mineral assemblage of tremolite, phlogopite, dolomite, calcite, microcline, quartz. The X_{CO_2} of fluid in epidote vein in the Kouquan valley is 0.08; while in its surrounding dolostone, larger than 0.4. The difference in X_{CO_2} in the vein and its surrounding rock also provides evidence that the fluid composition is controlled by buffering. The fluid composition in epidote vein remains unchanged, it shows that fluid composition is controlled by infiltration. The mineral assemblage in country rock is phlogopite, tremolite, calcite, and dolomite, which furthermore indicates that fluid composition is controlled by infiltration. To sum up, the metamorphic fluid composition in this region is controlled by combined buffering and infiltration.

The infiltrated fluid is usually less than 1/4 rock volume. Where is monomineral vein, there is more abundant infiltrated fluid, which in epidote vein is as high as whole rock volume(99%).