维普资讯 http://www.cqvip.com

1000-0569/2007/023(08)-2026-32 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

CO_2-CH_4 流体与金成矿作用：以阿尔泰山南缘和穆龙套金矿为例*

徐九华[1] 谢玉玲[1] 丁汝福[2] 阴元军[1] 单立华[1] 张国瑞[1]

XU JiuHua[1], XIE YuLing[1], DING RuFu[2], YIN YuanJun[1], SHAN LiHua[1] and ZHANG GuoRui[1]

1. 北京科技大学资源工程系，北京 100083
2. 北京矿产地质研究院，北京 100012
1. *Resource Engineering Department, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing* 100012, *China*

2007-04-30 收稿，2007-06-01 改回.

Xu JH, Xie YL, Ding RF, Yin YJ, Shan LH and Zhang GR. 2007. CO_2-CH_4 fluids and gold mineralization: southern margin of Altay, China and Muruntau of Uzbekistan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8):2026-2032

Abstract Gold Mineralization in orogenic gold deposits is closely related to H_2O-CO_2 fluids. However, aqueous-free CO_2-CH_4 fluids are also important in some gold deposits of the Central Asia metallogeny province, based on fluid inclusion study on gold deposits of southern margin of Altay in China and Muruntau gold deposit in Uzbekistan. X_{CH_4} of CO_2-CH_4 fluids at Sarekoubu gold deposit can be up to 0.20~0.23, and those in the Muruntau are 0.07~0.23. The role of CH_4 in fluids is to enlarge the mixing area of fluids, and is in favor of gold enrichment. The significance of CO_2 fluids in gold mineralzation includes three aspects, that is, including to balance pH range in ore-forming fluid and retain gold content in fluid so as to be complexed with sulfur, to enlarge temperature ranges of critical fluid, and to increase immiscible region of fluid. CH_4 is significant for immiscibility, and plays an important role for gold enrichment.

Key words Fluid inclusions, Orogenic gold deposit, CO_2-CH_4 fluid

摘 要 造山型金矿的成矿作用与 H_2O-CO_2 流体有着密切的联系。然而对阿尔泰山南缘和穆龙套金矿的流体包裹体研究表明，无水的 CO_2-CH_4 流体在中亚成矿域中一些金矿床中具有同样重要意义。阿尔泰山南缘萨热阔布金矿包裹体的 X_{CH_4} 达0.20~0.23，穆龙套金矿的 X_{CH_4} 为0.07~0.23。CH_4 扩大了流体不混溶的范围，有利于对 Au 的富集沉淀。CO_2 流体在 Au 成矿中的重要作用至少包括了三方面的意义，即：缓冲流体 pH 值范围、提高流体中的 Au 含量并使其维持与还原硫的络合作用进行迁移；扩大超临界流体的温度范围；增加流体不混溶的区域。CH_4 的加入扩大了流体不混溶的范围，有利于对 Au 的富集沉淀。

关键词 流体包裹体；造山型矿床；CO_2-CH_4 流体

中图法分类号 P618.51

造山型金矿床的成矿流体以低盐度、富 CO_2 的 H_2O-CO_2 体系为特征(Boullier *et al.*, 1998; Neumayr and Hagemann, 2002; Samson *et al.*, 1997; Uemoto *et al.*, 2002; Hagemann *et al.*, 2003; Fan *et al.*, 2003; 范宏瑞等,2003; Zhu *et al.*, 2001; Xu *et al.*, 1998)，纯 CO_2 或 CO_2-CH_4 包裹体也在一些金矿床中发育(Schmidt *et al.*, 1997; Xu and Pollard, 1999; 范宏瑞等, 2001; Xu *et al.*, 2005)。阿尔泰成矿带造山型金矿床的流体包裹体研究虽已积累了一些资料(廖启林等, 2000; 丁汝福等,2001; 闫新军和陈维民, 2001; 刘顺生等, 2003)，但多数文献没有详细描述包裹体的产出特征，包裹体成分多为群体分析资料，缺少包裹体岩相学观察的结果，对纯 CO_2 和 CO_2-CH_4 流体包裹体没有给予特别的关注。本文重点对阿尔泰山南缘金矿床和穆龙套金矿床的纯 CO_2 和 CO_2-CH_4 流体包裹体进行了研究，讨论了它们在金成矿过程的作用。

* 国家自然科学基金项目(40672060, 40572066)和中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室基金资助。

第一作者简介：徐九华，男，1951 年生，博士，教授，矿床学专业，E-mail：jiuhuaxu@ces.ustb.edu.cn

维普资讯 http://www.cqvip.com

1 地质概况

阿尔泰造山带(Altaids)横跨俄罗斯、哈萨克斯坦、中国和蒙古四国，其东部边界位于蒙古和中国东北大兴安岭的西部边缘，南部边界位于喀喇昆仑、塔里木和华北克拉通的北缘(Yakubchuk, 2004)。阿尔泰山成矿域是中亚巨型成矿域的重要组成部分，蕴藏了众多的新元古代到早中生代金、银、铜钼、铅锌和镍矿床(Heinhorst *et al.*, 2000; Yakubchuk, 2004)。阿尔泰造山带在我国新疆北部呈 NWW 向展布，绵延450km，向东进入内蒙古中西部直至大兴安岭西坡。中亚成矿域以其鲜明的古生代成矿作用、独特的成矿特点，与环太平洋成矿域和特提斯域相区别(涂光炽，1999)，近年来的研究表明印支期也是金-稀有金属-多金属成矿的重要时期之一(Zhu *et al.*, 2006, 2007; 朱永峰，2007)。

我国阿尔泰山南缘金矿床的成因类型称谓不一，但都与区域构造存在密切联系。刘顺生等(2003)将该区的原生金矿分为构造接触带型(哈巴河县多拉纳萨依金矿，Rb-Sr 法年龄 278 ± 5Ma; 赛都金矿，Rb-Sr 法 294 ± 14Ma)和构造破碎带型(富蕴县萨尔布拉克，Pb-Pb 法 304 ± 7Ma)两类。廖启林等(2000)称萨尔布拉克金矿为微细粒浸染型金矿。萨热阔布金矿床(Ar-Ar 年龄 320Ma，丁汝福等，2001)则被称为“断裂变质岩型”(尹意求，2004)。但金矿床总体分布受区域性额尔齐斯深断裂及其次级断裂控制，是 Groves 等定义的造山型金矿(Goldfarb *et al.*, 2001; Groves *et al.*, 2003)。陈衍景等(2001)认为多拉纳萨依、萨尔布拉克等金矿床的形成同步于沿额尔齐斯构造带的弧陆碰撞造山作用，建立了额尔齐斯金成矿带的碰撞造山成矿模式。朱永峰(2004)对北疆古生代造山带中韧性剪切带金矿床的成矿物理化学条件和流体来源进行了综合分析，认为金矿床的形成是造山带形成和演化的一个阶段性产物。

2 阿尔泰山南缘金矿床的 $CO_2 \pm CH_4$ 流体

CO_2 流体包裹体大量存在于地幔橄榄岩和下地壳麻粒岩中。造山型矿床中发育的富 CO_2 包裹体常由 H_2O-CO_2 体系不同的 CO_2/H_2O 比例组成，并与水溶液包裹体共存，如著名的小秦岭金矿田大量的富 CO_2 包裹体(L_{H_2O}-V_{CO_2} 型或 L_{H_2O}-L_{CO_2} 型)，纯 CO_2 包裹体较少发现。Schmidt *et al.* (1997)在加纳 Ashanti 成矿带金矿床观察到大量纯 CO_2 包裹体产出，却少水溶液包裹体，并认为可能是一种还未认识的成矿流体类型。近年来，在阿尔泰山南缘萨热阔布金矿床主成矿阶段脉石英中也发现存在大量无水的高密度 CO_2 流体包裹体(Xu *et al.*, 2005)。初步研究还表明，阿尔泰山南缘其他金矿床，如赛都、多拉纳萨依等也有成群的 $CO_2 \pm CH_4 \pm N_2$ 流体。

2.1 萨热阔布金矿床的高密度 CO_2 流体

阿勒泰市萨热阔布金矿床位于阿尔泰造山带南缘中部的阿巴宫-库尔提断裂北侧，产于下泥盆统康布铁堡组上亚组第二岩性段($D_1k_2^2$)内，矿化类型有蚀变岩型和石英脉型。研究表明，矿床中成群产出的单相 CO_2 包裹体有几种情况(图1)：(1)近矿蚀变的变晶屑凝灰岩(黑云石英片岩)中

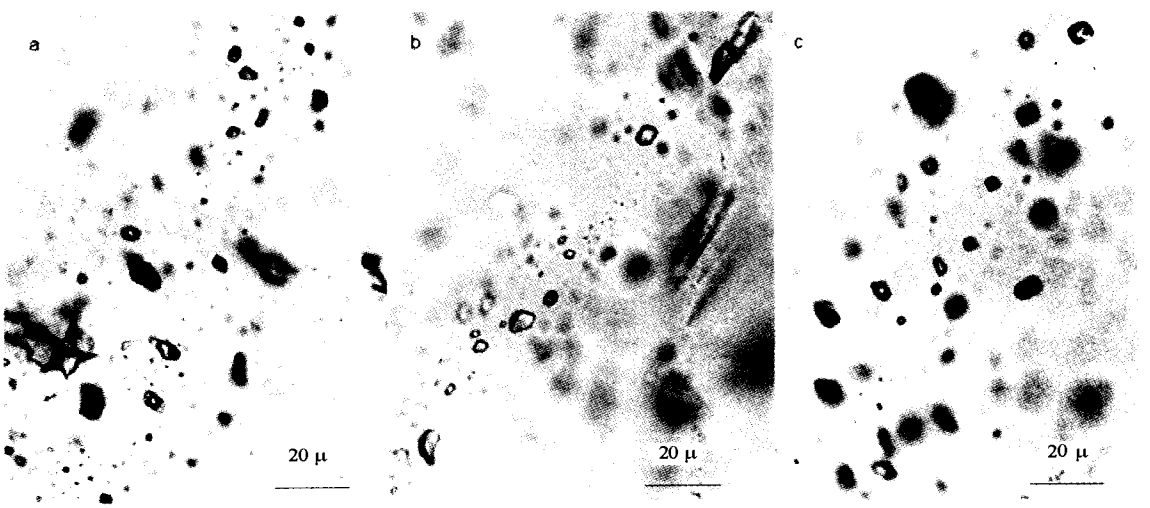


图1 萨热阔布金矿纯 CO_2 包裹体产出特征

a-石英晶屑中热液交代形成的次生纯 CO_2 和富 CO_2 包裹体，SR17; b-硫化物-石英脉中的原生纯(L_{CO_2})包裹体，SR22; c-黑云石英片岩中石英脉，线状分布的纯 CO_2 包裹体垂直石英脉延长方向，SR25

Fig. 1 Pure CO_2 fluid inclusions at Sarekoubu gold deposit

(a) Secondary CO_2-rich fluid inclusions in quartz crystal detritus in tuff, SR17; (b) Primary CO_2 fluid inclusions in sulfide-quartz vein, SR22; (3) CO_2 fluid inclusions occurring in quartz within biotite-quartz schist, SR25

维普资讯 http://www.cqvip.com

脉状热液石英中,或石英晶屑中次生的纯 CO_2 包裹体,它们垂直石英脉透镜体(或片理)长轴方向呈线状分布;(2)早阶段黄铁矿-石英脉中次生/假次生液态纯 CO_2 包裹体,包裹体形态多为浑圆状、负晶形状,5~15μm,沿主矿物石英的生长愈合裂隙分布;(3)与黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等伴生的多金属硫化物阶段石英中的纯 CO_2 包裹体,形态亦为浑圆状、负晶形状,5~15μm,沿主矿物石英的愈合裂隙分布。显微测温和激光拉曼探针分析均证明了这类包裹体为无水的 $CO_2 \pm CH_4$ 体系流体(Xu *et al.*, 2005)。据 Theiry *et al.* (1994)的 VX 相图可求得 CH_4 摩尔分数达 0.20~0.23,摩尔体积为 42~57cm^3/mol。

2.2 赛都金矿床的富 $CO_2 \pm CH_4$-N_2 流体

哈巴河县赛都金矿位于克兰弧后盆地西端,NW 向玛尔卡库里巨型剪切构造带长 100km 以上,其派生的托库孜巴依剪切带控制了赛都金矿田的主矿段。区内主要容矿地层为中—下泥盆统托克萨雷组沉积岩系,局部夹有少量火山岩,岩石已变形变质,由石英绢云千枚岩,变质砂岩等组成。与成矿有关的哈巴河斜长花岗岩体出露面积达 800km^2,分布于矿带北部。热液成矿阶段可分成 4 个:(Ⅰ)早期硅化阶段;(Ⅱ)浸染状黄铁矿-白色石英阶段;(Ⅲ)多金属硫化物-烟灰色石英阶段;(Ⅳ)晚期石英-方解石阶段。在阶段Ⅱ、Ⅲ的石英存在大量流体包裹体,可分成 3 种类型:(1)水溶液包裹体(L_{H_2O}-L_{CO_2} 和 L_{H_2O}-V_{CO_2});(2) CO_2-H_2O 包裹体(L_{CO_2}-L_{H_2O});(3)富 CO_2 或富 N_2 包裹体。

CO_2 包裹体在阶段Ⅱ和Ⅲ都能见到,CO_2 固相的融化温度(T_{m,CO_2})小于 -57℃,甚至低于 -63.1℃~-64.5℃,反映了一定量的 N_2 或 CH_4 等挥发分存在。富 N_2 包裹体常表现为很暗的单相包裹体,与 CO_2-H_2O 包裹体一起产出于阶段Ⅱ中,它们冷冻至 -195℃无明显相变。激光拉曼探针分析表明,对于纯 CO_2 包裹体,在拉曼位移 1384 cm^{-1}和 1278cm^{-1}附近显示了清晰的 CO_2 谱峰,没有 CH_4 或其它烃类谱峰的显示。而对于 $T_{m,CO_2} < -57$℃的包裹体,还显示了清晰的 N_2 谱峰(图 2,拉曼位移 2327~2329cm^{-1})。这些结果与包裹体冷冻法实验过程的观察到的相变特征一致。

3 乌兹别克斯坦穆龙套金矿

乌兹别克斯坦共和国穆龙套金矿是世界著名的超大型金矿,其 Au 金属量(平均品位为 2~3g/t)超过 4300t(Graupner *et al.*, 2001)。矿床与黑色岩系有密切的成因联系,是中亚成矿域南天山成矿带的典型矿床之一。对该矿床的成矿地质背景、成矿机理和成因引起了各国地质学家极大的兴趣。相对于很多前寒武纪地层中的造山型金矿(Goldfarb *et al.*, 2001; Groves *et al.*, 2003)而言,其古生代成矿是重要的特征。矿床成因观点主要有岩浆热液说和变质成矿说(Kremenetsky, 1994; Graupner *et al*, 2001)。穆龙套金矿早期的成矿流体研究仅见于少数俄国学者的研究文献中(Alyoshin, 1994),近年来 Graupner *et al.* (2001)和 Wilde *et al.* (2001)进行了较详细的研究。Graupner *et al.* (2001)的研究表明,单相或两相原生 CO_2 包裹体是穆龙套金矿成矿流体的主要类型,并认为在金成矿过程发生了 CO_2-H_2O 的相分离。Wilde *et al.* (2001)在穆龙套金矿还发现了几乎为纯 CH_4 的包裹体,及微量 H_2S 的 CO_2 包裹体,认为含金流体的演化是一个相对还原(富 CH_4)到氧化(富 CO_2)的过程。2006 年我们考察了穆龙套金矿,对矿化石英脉的流体包裹体进行了研究,发现研究样品的成矿流体几乎都是无水的不同 CO_2/CH_4 比例的 CO_2-CH_4 流体体系。

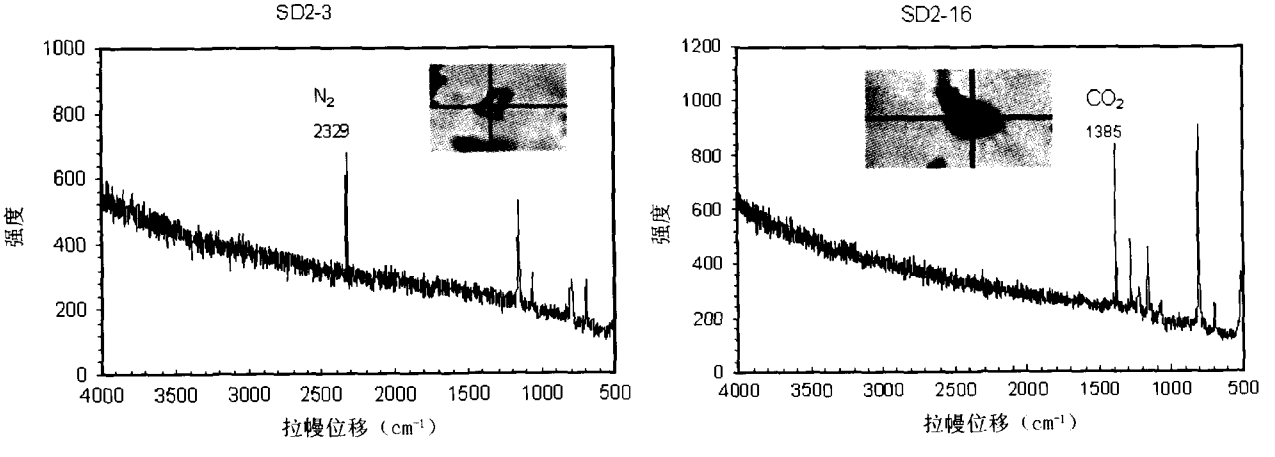


图 2 赛都金矿富 N_2 或富 CO_2 包裹体激光拉曼探针分析

Fig. 2 Laser Raman spectrum of N_2-rich and CO_2-rich fluid inclusions from Saidu gold deposit

维普资讯 http://www.cqvip.com

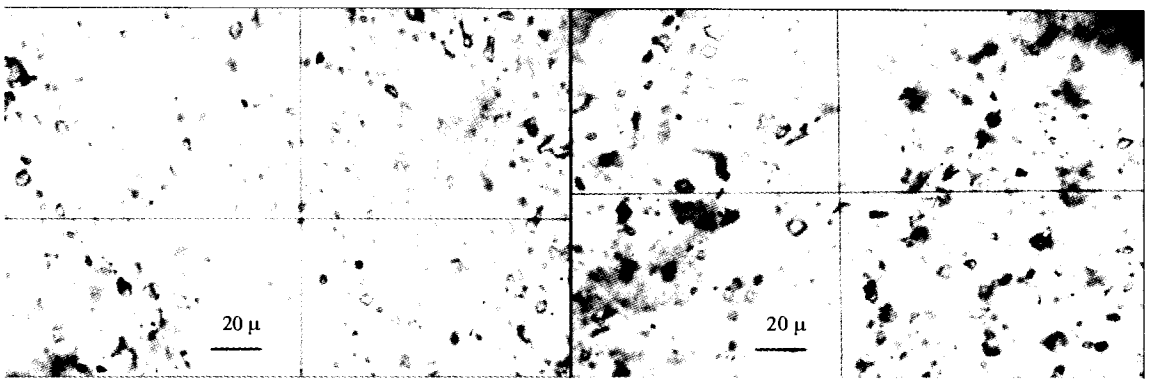


图 3 穆龙套金矿成群产出的 CO_2-CH_4 包裹体

Fig. 3 CO_2-CH_4 inclusions in vein quartz of Muruntau gold deposit

表 1 穆龙套金矿石英脉 CO_2-CH_4 包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometry of fluid inclusions in gold-bearing veins at Muruntau deposit

样号	特 征	大小(μm)	T_{m,CO_2}(℃)	T_{h,CO_2}(℃)	X_{CH_4}	V(cm³/mol)
MLT04	白色石英脉,含碳质细脉	7.5～20(21)	-62.5～-59.8(9)	+11.8～+25(12)	0.10～0.23	51～78
MLT05	硅化碳质板岩中含毒砂硫化物石英脉	7.8～13.6(19)	-65～-58.7(18)	-27.5～+3.1(15)	0.07～0.18	44～56
MLT06	含浸染状黄铁矿-黄铜矿的石英脉,含碳质细脉	6.6～13.1(8)	-58.6～-59.9(5)	+12.7～+25.3(5)	0.09～0.10	58～79
MLT07	褐铁矿化石英脉	5.5～15.3(15)	-59.0～-59.2(10)	+24.8～+27.8(10)	0.09～0.10	85
MLT08	褐铁矿化石英脉,含碳质	6.3～25.4(15)	-61.8～-58.9(5)	+14.7～+23.3(5)	0.07	62
MLT09	褐铁矿化石英脉	6～15(13)	-64.4～-61.6 (8)	+17.2～+22.9(7)		

X_{CH_4} 和 V 根据 Theiry *et al.* (1994)的 VX 相图，利用 T_{m,CO_2} 和 T_{h,CO_2} 交叉法分析求得；括号中的数字为测量数

3.1 流体包裹体岩相学和显微测温

研究样品采自穆龙套金矿露天采场的北帮，主要类型为(含碳质)褐铁矿化石英脉、含毒砂石英脉、含碳质细脉多金属硫化物石英脉和围岩中的石英脉体。对各种类型的石英磨制了包裹体片进行观察研究。按室温下相态特征分类，可有 2 类：1) CO_2-CH_4 包裹体(图 3)，浑圆状至不规则状，大小几 μm 至 25μm 不等，所有样品中 90% 以上的包裹体属于此类，为原生成因；2) H_2O-CO_2 包裹体，很少见到，穿切前者，故为次生。CO_2-CH_4 包裹体室温下呈单相，冷冻过程常分离出气泡，三相点(T_{m,CO_2})都低于 -56.6℃(表 1)，一般为 -58.6～-65℃，说明除 CO_2 外有较高含量的 CH_4 或其他成分。部分均一温度(T_{h,CO_2})变化大，从 -27.5℃～+27.8℃。T_{m,CO_2} 和 T_{h,CO_2} 有一定的相关性(图 4)，这与流体体系中的 CH_4 含量有关。根据 Theiry *et al.* (1994)的 VX 相图分析，利用 T_{m,CO_2} 和 T_{h,CO_2} 交叉法求得 CH_4 摩尔分数约 0.07～0.23，摩尔体积为 44～90cm³/mol。

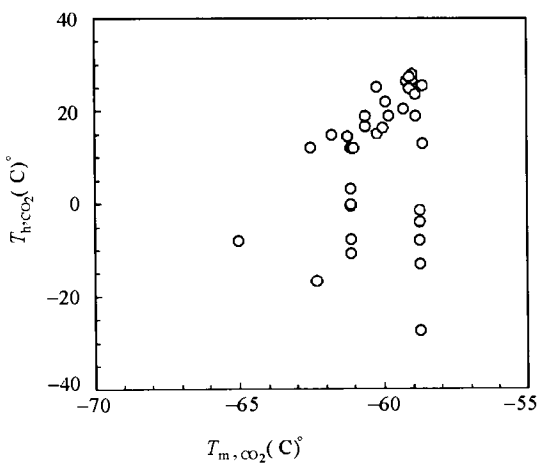


图 4 CO_2-CH_4-N_2 流体包裹体三相点和均一温度关系图

Fig. 4 Correlations between the triple points and homgenization temperatures of CO_2(±CH_4-N_2) inclusions from Muruntau

维普资讯 http://www.cqvip.com

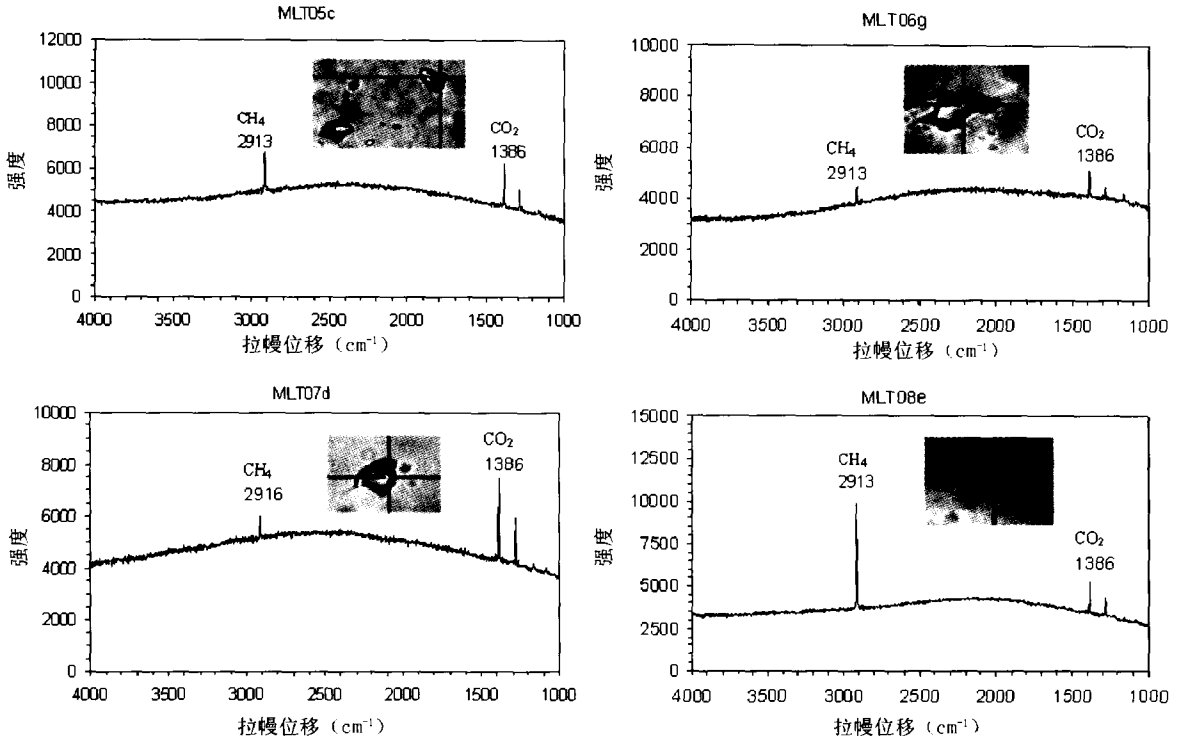


图5 穆龙套金矿脉石英 CO_2-CH_4 包裹体的激光拉曼谱峰

Fig. 5 Laser Raman spectrum of fluid inclusions in quartz at Muruntau gold deposit

3.2 激光拉曼探针分析

在中国科学院地质与地球物理研究所流体包裹体实验室进行了激光拉曼探针分析(RAM)，目的是确认流体包裹体的成分特征。测试仪器型号 Renishaw 公司 RM-2000 型，实验条件为514nm Ar^+激光器，光谱计数时间10s，每 cm^{-1}全波段一次取峰，激光束斑1μm。共做了60多个单相包裹体的RAM分析，结果表明均为 CO_2-CH_4 包裹体，除了在拉曼位移1385cm^{-1}和1278cm^{-1}附近显示了清晰的 CO_2 谱峰外，还在2913cm^{-1}附近显示了 CH_4 谱峰(图5)。与包裹体冷冻法实验过程观察到的相变特征完全一致。

4 讨论

4.1 CO_2-CH_4 流体的性质

岩石中的含碳流体可以是岩浆成因的，也可以是有机质的分解，与石墨有关的氧化反应，或是钙硅酸盐岩石的脱碳反应产物(Van den Kerkhof and Thiery, 2001)。由于矿物缓冲(因 f_{O_2} f_{N_2} 等的影响)，导致 CO_2-CH_4(还原)和 CO_2-N_2(氧化)二元混合流体的形成。CO_2-CH_4 体系的低温相变过程有两种情况：1)包裹体的均一温度(T_{h,CO_2})高于固相熔化温度(T_{m,CO_2})，在31℃前液气均一成单相(液相、气相或临界态)；2)T_{h,CO_2} 低于 T_{m,CO_2}，最后固相熔化或升华成单相。Van den Kerkhof and Thiery(2001)称前者为H-型包裹体，后者为S-型包裹体。上述矿床实例中的 CO_2-CH_4 包裹体大部分为H-型包裹体，且在显微测温的升温过程都经历了 SLG→LG→L 的相变，仅少数包裹体为S-型包裹体，其升温相变为 SLG→SL→L。

由于激光拉曼探针证实穆龙套金矿、萨热阔布金矿的流体为 CO_2-CH_4 体系，所以可根据 Thiery *et al.* (1994)的 *V-X* 相图，由显微测温中获得的 T_{h,CO_2} 和 T_{m,CO_2} 来求得体系的摩尔体积(cm^3/mol)和 CH_4 的摩尔分数 X_{CH_4}。计算结果表明，穆龙套金矿 CO_2-CH_4 流体体系的 X_{CH_4} 为0.07～0.23，摩尔体积为44～79 cm^3/mol，相当于密度1～0.56g/cm^3。萨热阔布金矿的 CO_2-CH_4 流体体系的 X_{CH_4} 为0.01～0.23，摩尔体积为42～59cm^3/mol，相当于密度1.02～0.74g/cm^3。取共生的 CO_2-H_2O 体系包裹体均一温度的较低值250℃～280℃作为包裹体最低捕获温度，流体密度近似看作 CO_2 密度值，在 Van den Kerkhof (2001)的 CO_2 体系高温高压相图可得到流体最低捕获压力范围约150～320MPa，显示了造山型金矿较高的成矿压力环境。

4.2 CO_2-CH_4 包裹体与 Au 成矿作用

富含 CO_2、低盐度的 H_2O-CO_2 体系包裹体在造山型金矿床中已属普遍现象，纯 CO_2 或 CO_2-CH_4 包裹体也在一些矿床中大量发育。有关 CO_2 流体的起源、性状及对 Au 成矿作

维普资讯 http://www.cqvip.com

用的贡献等方面的认识还存在争论。Xu and Pollard(1999)对澳大利亚 Eastern Mount Isa Fold Belt 同造山石英脉体进行了研究，认为该区大量发育的富 CO_2 流体是同造山过程 H_2O-CO_2-NaCl 体系相分离后被选择性捕获的结果。Schmidt *et al.*(1997)曾报道了加纳 Ashanti 金矿带的极富 CO_2 流体($X_{CO_2}>0.8$)，并认为这种纯 CO_2 或 $CO_2 \gg H_2O$ 的流体可能代表了一种还未认识的成矿流体类型，因为现有的解释(水从捕获后的 H_2O-CO_2 体系里淋失，或捕获前 H_2O-CO_2 体系的相分离)都不能说明区域尺度上纯 CO_2 流体大量存在而缺乏 H_2O 溶液流体。但 Klemd(1998)则认为纯 CO_2 流体是绿片岩相退变质过程的同期韧性变形中 H_2O-CO_2-盐体系流体相分离的结果。不过 Schmidt *et al.*(1998)坚持认为 Ashanti 金矿床的矿化与退变质蚀变无关。

Au 成矿与 CO_2 的流体有着密切的联系，不少文献证实含金石英脉与非含金石英脉的包裹体在 CO_2 含量上有较大差别，前者往往富 CO_2 流体。但由于 Au 离子和 CO_2 的化学键不强，一般认为 CO_2 对 Au 迁移不可能起直接作用。Phillips and Evans(2004)通过比较富 CO_2 流体(10mol% CO_2)和贫 CO_2 流体(0.1mol% CO_2)的含 Au 性研究，提出 CO_2 在金成矿过程中起了关键性的作用，其主要意义是缓冲流体 pH 值范围、提高流体中的 Au 含量并使其维持与还原硫的络合作用进行迁移，尔后在化学有利的容矿岩石中使 Au 沉淀。赫英和廖永胜(2001)通过对胜利油田 CO_2 气藏区和非 CO_2 气藏区火山岩中 Au 含量有很大差别，前者含 Au 为 327×10^{-9}，而后者仅 2.5×10^{-9}，认为地幔 CO_2 去气对形成富含 Au 流体有重要贡献。Yang and Scott(1996)发现在海底块状硫化物矿床的火山岩的熔体包裹体富 CO_2 气泡中 Au 等金属成矿元素含量很高，提供了 Au 富集于岩浆排出的富 CO_2 挥发分中的直接证据。

流体的不混溶也是导致 Au 沉淀的重要因素，Bower(1991)的实验证明了 Au 的沉淀与流体的不混溶有关。Au 的成矿流体不混溶主要是由 H_2O-CO_2 流体在较低温度下的相分离(不混溶区域增大)造成的，温度下降引起不混溶范围大大增加。CH_4 对不混溶有着更大的影响，300℃时，CO_2 含量必须大于 15mol%才可发生流体的不混溶，而 CH_4 含量大于 5mol%时就能发生不混溶(Nadon,1989)。所以 CH_4 含量的增加有利于扩大流体不混溶的范围。

另一方面，CO_2-H_2O 流体与 CH_4-H_2O 流体混合会导致石墨沉淀，即：$CH_4 + CO_2 = 2C$(石墨) $+ 2H_2O$(Craw,2002)，这也可以用来解释在一些剪切带型金矿含金石英脉的近矿富碳质蚀变岩的存在，石墨的沉淀导致热液物理化学条件的改变，碳质也是金的有利吸附剂。因此，CO_2-H_2O 流体与 CH_4-H_2O 流体的混合有利于金的沉淀。目前关于 CH_4 对于 Au 成矿的作用还了解不甚清楚，但大量无水 CO_2-CH_4 流体在穆龙套超大型金矿发育的事实说明 CH_4 和 CO_2 一样，也对 Au 的富集起了重要的作用。

5 结论

(1)造山型金矿的成矿作用与 H_2O-CO_2 流体有着密切的联系，流体包裹体研究表明，阿尔泰成矿域中无水的 CO_2-CH_4 流体在一些金矿可能具有更重要的意义，如穆龙套金矿和阿尔泰南缘的一些金矿床。CH_4 扩大了流体不混溶的范围，有利于对 Au 的富集沉淀。

(2)CO_2 流体在 Au 成矿中的重要作用至少包括了三方面的意义，即：缓冲流体 pH 值范围、提高流体中的 Au 含量并使其维持与还原硫的络合作用进行迁移；扩大超临界流体的温度范围；增加流体不混溶的区域。

致谢 本论文涉及的野外工作得到新疆阿尔泰地区有关单位、乌兹别克斯坦塔什干工业大学 Akbarov 教授的帮助，北京科技大学何知礼教授提供了考察穆龙套金矿的机会，激光拉曼探针分析得到中国科学院地质与地球物理研究所范宏瑞研究员和胡芳芳博士的帮助。北京大学朱永峰教授对论文提出了宝贵意见，在此一并致谢。

References

Ahyoshin AP. 1994. Evolution of mineralizing solutions and physicochemical characteristics of gold precipitation at the Muruntau deposit (Central Kyzylkum, Uzbekistan). In: The 9th Symposium of IAGOD Abstracts, Vol. 2. Beijing, China, 444 - 445

Boullier AM, Firdaous K and Robert F. 1998. On the significance of aqueous fluid inclusions in gold-quartz vein deposits from the southeastern Abitibi Sub Province (Quebec, Canada). Econ. Geol., 93: 216 - 223

Cole A, Wilkinson JJ, Halls C and Serenko TJ. 2000. Geological characteristics, tectonic setting and preliminary interpretations of the Jilau gold-quartz vein deposit, Tajikistan. Mineralium Deposita, 35: 600 - 618

Craw D. 2002. Geochemistry of late metamorphic hydrothermal alteration and graphitisation of host rock, Macraes gold mine, Otago Schist,, New Zealand. Chemical Geology, 191:257 - 275

Ding RF, Wang JB, Ma ZM, Zhang JH and Fang TH. 2001. Geochemical characteristics of the Sarekoubu volcanic exhalation-sedimentary-superimposition gold deposit in Xinjiang. Geology and Prospecting. 37(3): 11 - 15 (in Chinese with English abstract)

Fan HR, Groves DI, Mikucki EJ and McNaughton NJ. 2001. Fluid mixing in the generation of Nevoria gold mineralization in the Southern Cross Greenstone Belt, West Australia. Mineral Deposits, 20(1): 37 - 43 (in Chinese with English abstract)

Fan HR, Xie YH, Zhai MG and Jin CW. 2003. A three stage fluid flow model for Xiaoqinling lode gold metallogenesis in the He nan and Shaanxi provinces, central China. Acta Petrologica Sinica, 19(2): 260 - 266 (in Chinese with English abstract)

Goldfarb RJ, Groves DI and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. Ore Geology Review, 18:1 - 75

Graupner T, Kempe UIF, Spooner ETC, Bray CJ, Kremenetsky AA and Irmer G. 2001. Microthermometric, laser raman spectroscopic, and volatile-ion chromatographic analysis of hydrothermal fluids in the Paleozoic muruntau Au-bearing quartz vein ore field, Uzbekistan. Economic Geology, 96: 1 - 23

Groves DI, Goldfarb RJ, Robert F and Hart CJR. 2003. Gold deposits in

维普资讯 http://www.cqvip.com

metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. Economic Geology, 98:1 29

Hagemann SG and L ders V. 2003. *P-T-X* conditions of hydrothermal fluids and precipitation mechanism of stibnite-gold mineralization at the Wiluna lode-gold deposits, Western Australia: Conventional and infrared microthermometric constraints. Mineralium Deposita, 38: 936 - 952.

He GQ and Zhu YF. 2006. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang, China, and its adjacent regions. Geology in China, 33(3): 451 - 460 (in Chinese with English abstract)

He Y and Liao YS. 2001. Auriferous CO_2-rich fluids in Shengli oil field, Shandong province and their origin. Geoloical Review, 47(5): 500 - 507(in Chinese with English abstract)

Heinhorst J, Lehmann B, Ermolov P *et al.* 2000. Paleozoic crustal growth and metallogeny of Central Asia: Evidence from magmatic-hydrothermal ore systems of Central Kazakhstan. Tectonophysics 328: 69 - 87

Klemd R. 1998. Comment on the paper by Schmidt Mumm *et al.* High CO_2 content of fluid inclusions in gold mineralisations in the Ashanti Belt, Ghana: A new category of ore forming fluids? (Mineralium Deposita,32: 107 - 118, 1997). Mineralium Deposita, 33: 317 - 319

Kremenetsky A. 1994. Ore-forming theory for super-large ore deposit. In: The 9th Symposium of IAGOD Abstracts, Vol. 2. Beijing, China, 443 - 444

Liao QL, Dai TG, Deng JN and Wang JS. 2000. A study of metallogenic geochemical characteristics of major gold deposits in North Xinjiag. Mineral Deposits, 19(4): 297 - 317 (in Chinese with English abstract)

Liu SS, Li ZC, Tan KX *et al.* 2003. Deformation, metamorphism and fluids in Altay Orogenic Belt, China, Beijing: Geological Publishing House, 1 - 152 (in Chinese)

Nadon J. 1989. Role of methane and carbon dioxide in gold deposition. Nature, 342: 793 - 795

Neumayr P and Hagemann SG. 2002. Hydrothermal fluid evolution within the Cadillac Tectonic Zone, Abitibi Greenstone Belt, Canada: Relationship to auriferous fluids in Adjacent Second- and Third-Order Shear Zones. Economic Geology, 97: 1203 - 1225

Samson IN, Bas B and Holm PT. 1997. Hydrothermal evolution of auriferous shear zone, Wawa, Ontario. Economic Geology, 92: 325 - 342

Schmidt MA, Oberthür T, Vetter U and Blenkinsop TG. 1997. High CO_2 content of fluid inclusions in gold mineralisations in the Ashanti Belt, Ghana: A new category of ore forming fluids? Mineralium Deposita 32: 107 - 118

Theiry R, Van den Kerkhof A and Dubessy J. 1994. *VX* properties of CH_4-CO_2 and CO_2-N_2 fluid inclusions: Modelling for $T<31℃$ $P>400$bars. Eur. J. Mineral. 6: 753 - 771

Tu GZ. 1999. On the certral asiametallogenic province, Scientia Geologica Sinica, 34 (4): 397 - 404

Uemoto T, Ridley J, Mikucky E *et al.* 2002. Fluid chemical evolution as a factor in controlling the distribution of gold at the Archean Golden Crown Lode Gold Deposit, Murchison Province, Western Australia. Economic Geology, 97: 1227 - 1248

Van den Kerkhof A and Thiéry R. 2001. Carbnic inclusions. Lithos, 55: 49 - 68

Wilde AR, Layer P, Mernagh T and Foster J. 2001. The giant Muruntau gold deposit: Geologic, geochronologic, and fluid inclusion constraints on ore genesis. Economic Geology, 96:633 - 644

Xu G and Pollard PJ. 1999. Origin of CO_2-rich fluid inclusions in synorogenic veins from the Eastern Mount Isa Fold Belt, NW Queensland, and their implications for mineralization. Mineralium Deposita, 34: 395 - 404

Xu JH, Ding RF, Xie YL, Zhong CH and Yuan X. 2005. Pure CO_2 fluids in the Sarekoubu gold deposit at southern margin of Altai Mountains in Xinjiang, West China. Chinese Science Bulletin, 50 (4): 333 - 340

Xu JH, Xie YL, Jiang N *et al.* 1998. Minerological, fluid inclusion, and stable isotope study of Wenyu-Dongchuang gold deposits in the Xiaoqinling Mt. area, west Henan, China. Explor. Minning Geol., 7(4): 321 - 332

Yakubchuk A. 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: A revised model. Journal of Asian Earth Sciences, 23: 761 - 779

Yan XJ and Chen WM. 2001. Geological and geochemical study on Tiemierte-Qaxia-Sarekuobu polymetallic gold deposit series. Mineral Resources and Geology, 15 (4): 366 - 370 (in Chinese with English abstract)

Yang KH and Scott SD. 1996. Possible contribution of metal-rich magmatic fluid to a seafloor hydrothermal system. Nature, 383: 420 - 423

Zhu YF. 2004. Ductile-shear zone related gold deposits in Craton and Paleozoic Orogenic belt: An analysis of their ore-forming processes and environments. Mineral Deposits, 23 (4): 509 - 519 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF. 2007. Indosinian movement and metallogeny in Xinjiang. Geological Bulletin of China, 26 (3): 8 - 17 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF, Jiang N and Zeng YS. 2001. Geochemistry of the ore-forming fluids in gold deposits from the Taihang Mountains, Northern China. International Geology Review, 43: 457 - 473

Zhu YF, Zeng YS and Gu LB. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountain, northwest China. Journal of Asian Earth Sciences, 27: 61 - 77

Zhu YF, Zhou J and Zeng YS. 2007. The Tianger (Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, west Tianshan, NW China: Petrographic and geochemical characteristics. Ore Geology Review, 32:337 - 365

附中文参考文献

丁汝福,王京彬, 马忠美, 张进红,方同辉. 2001. 新疆萨热阔布火山喷流沉积改造型金矿地球化学特征. 地质与勘探, 37(3):11 - 15

范宏瑞, 谢奕汉, 翟明国, 金成伟. 2003. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用. 岩石学报, 19(2):260 - 266

范宏瑞,Groves DI,Mikucki EJ,McNaughton NJ. 2001. 西澳大利亚纳沃日金矿流体混合与金的成矿作用. 矿床地质, 20(1):37 - 43

何国琦,朱永峰.2006. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究. 中国地质,33(3):451 - 460

赫英,廖永胜.2001. 胜利油田富 CO_2 含金流体及有关成因问题. 地质论评,47(5): 500 - 507

廖启林, 戴塔根, 邓吉牛,王军升. 2000. 新疆北部主要金矿床的成矿地球化学特征. 矿床地质, 19(4): 297 - 317

刘顺生,李志纯,谭凯旋等. 2003. 中国阿尔泰造山带的变形变质及流体作用. 北京: 地质出版社,1 - 152

涂光炽.1999. 浅议中亚成矿域. 地质科学, 34 (4) : 397 - 404

闫新军,陈维民. 2001. 铁米尔特-恰夏-萨热阔布多金属金矿床系列矿床地质地球化学研究. 矿产与地质,15(4): 366 - 370

朱永峰. 2004. 古老克拉通和古生代造山带中的韧性剪切带型金矿: 金矿成矿条件与成矿环境分析. 矿床地质, 23 (4): 509 - 519

朱永峰. 2007. 新疆的印支运动与成矿. 地质通报,26(5): 510 - 519