文章编号:1673-9469(2015)04-0098-06 doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.04.021

邯郸洪山金矿化区石英脉流体包裹体特征

张景森[1,2],翟艳超[1],高明尚[1],张 静[1,3]
(1.河北工程大学 资源学院,河北 邯郸 056038;2.河北工程大学 河北省资源勘测研究实验室,河北 邯郸 056038;3.河北工程大学 图书馆,河北 邯郸 056038)

摘要:为探讨邯郸洪山杂岩金矿化区成矿热液流体特征及其来源,测试区内石英脉流体包裹体均一温度和盐度,分析石英脉微量元素和铷、锶同位素,估算包裹体捕获温度和压力、pH值和Eh值。结果表明,流体包裹体主要为液体和富液体包裹体,均一温度206℃~305℃,平均值为254℃,流体盐度变化于7.17~10.19 wt% NaCl,平均值为8.36 wt% NaCl,热液属于低温、低盐度流体;包裹体捕获的平均温度为303℃,平均压力为721×10^{5}Pa,约相当于2.40 km的深度;流体富含多种微量元素,随温度、压力等条件变化而变化,具有比围岩和周围侵入岩高的铷、锶同位素比值;热液流体具有明显大气降水来源特征。

关键词:流体包裹体;石英脉;金矿化;洪山杂岩
中图分类号:P614 **文献标识码**:A

Characteristics of fluid inclusions in quartz veins from the gold mineralization zone in Hongshan complex, Handan

ZHANG Jing-sen[1,2], ZHAI Yan-chao[1], GAO Ming-shang[1], ZHANG Jing[1,3]
(1. College of Resource Sciences, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;
2. Key Laboratory of Resource Survey and Research of Hebei Province, Hebei Handan 056038, China;
3. Library, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: For discussing the characteristics and sources of the hydrothermal fluid in the gold mineralization zone in Hongshan complexes near Handan city, homogenization temperatures and salinities of the fluid inclusions in quartz vein from this area are tested, trace elements and Rb-Sr isotopes of the quartz vein are analyzed; the temperature and pressure, pH and Eh values of the fluid inclusions being taken are estimated. The results show that, fluid inclusions are mostly liquid and liquid-rich types with the homogenization temperatures varying from 206°C to 305°C and a mean of 254°C, and with the salinites varying from 7.17 wt% NaCl to 10.19 wt% NaCl and a mean of 8.36 wt% NaCl, they belong to the low-temperature and low-salinity hydrothermal fluid. Those inclusions are taken at a mean temperature of 303°C and a mean pressure of 721×10^{5}Pa or a depth about 2.40km. The fluid enriches multiple trace elements and their contents are influenced by the temperature and pressure and so on, the Rb-Sr isotope ratios are higher than the main intrusive rocks, wall rock or ones around the complex area. These characteristics reveal that the hydrothermal fluid is obviously characterized by the meteoric water.

Key words: fluid inclusion; quartz vein; gold mineralization; Hongshan complex

邯郸洪山金矿化区位于华北东部太行山成矿带的邯(郸)邢(台)成矿区东缘的洪山碱性杂岩体内。该区发现的金矿点和铜矿点,引起了广大地质和矿产工作者的极大关注[1-4]。然而,长期以来,对于该区多金属成矿作用研究十分薄弱,对金矿床成因类型划分还处于按赋矿围岩性质的描

收稿日期:2015-06-20
基金项目:河北省自然科学基金资助项目(D2013402026)
作者简介:张景森(1966-),男,山东泗水人,博士,教授,从事地质资源与地质工程领域研究。

述性模式阶段,如碱性岩型金矿床[5]、火山热液含金蚀变岩型金矿床[6]等,这些描述性模型并不能给出较多的矿床地质特征或成因信息。该区金矿化无疑是含矿热液作用的结果,成矿流体对金等的矿化作用起着十分关键的作用[7]。在研究热液流体成矿作用时,矿物中的流体包裹体研究具有不可替代的作用[7-8]。本文报道了洪山金矿化区石英脉流体包裹体特征,可以为研究洪山金等的多金属矿化作用提供成矿热液方面的证据。

1 地质背景

邯邢矿区处于华北板块内太行山造山带南段,以太行山前断裂 - 邯郸断裂 - 与华北平原相接。区域出露地层自西向东有太古宇赞皇群、元古宇长城系、古生界、中生界和新生界,地层总体走向 NE,向 SE 缓倾斜,构成单斜式构造。在单斜上发育有 NE、NNE 向展布的褶皱、断层和中生代岩浆岩带。

洪山杂岩体处于邯邢矿区东缘,是白垩纪塌陷破火山口机构,面积约 50 km^2,由粗面熔岩、粗面凝灰熔岩、粗面凝灰岩、晶屑凝灰岩和正长岩构成。外围地层有古生界奥陶系、石炭系、二叠系。杂岩体西侧紧接紫山断层、东侧为邯郸断裂带。岩体内发育有由火山口塌陷形成的环形断裂和由区域应力作用形成的 NNE、SN 向断裂(见图 1)。

对区内正长岩的锆石 U - Pb 同位素定年结果为(135 ±2.7) Ma[9]。根据 2014 年最新中国地层表,该区岩浆活动时间属于白垩纪早期[10]。

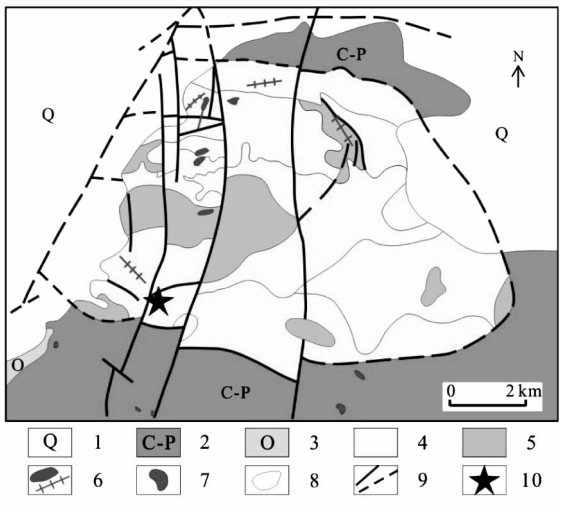


图1 洪山杂岩体平面地质图及石英脉采样位置(据文献[6]修改)

Fig. 1 Geological map of Hongshan complex and the sampling location of quartz vein

1—第四系,2—石炭二叠系,3—奥陶系,4—粗面岩、凝灰岩,5—正长岩,6—正长斑岩(脉),7—闪长岩,8—地层、岩性界线,9—断层,10—采样点位置。

2 矿床地质特征

洪山金矿床赋存在洪山杂岩体内北部,呈复杂脉状产于粗面熔岩、粗面凝灰岩中,主要由受 SN 向断裂控制的破碎带蚀变岩构成。区内由西向东分布有 3 条近等距的矿化带,其中以中间矿化带规模较大,矿体赋存在矿化带的两侧,矿体产状有陡倾和平卧两种,矿体厚度较稳定。

矿石品位低,总体平均品位为 3.46×10^{-6},局部富集、最高品位可达 64.58×10^{-6}。矿石中金属矿物含量约 5 %,主要是微量自然金与银金矿、针铁矿、赤铁矿、磁铁矿和少量黄铁矿、方铅矿和辉铅矿;脉石矿物含量约 95%,主要是长石类和粘土类矿物,其中长石类矿物有透长石、微斜长石、钠长石和中长石,粘土类矿物有绿泥石、高岭石等。另外,还可见到少量石英、玉髓、绢云母、黑云母、角闪石、辉石等矿物,偶见方解石、黄钾铁矾、金红石、榍石、电气石等[6]。矿化蚀变主要是针铁矿化、赤铁矿化,其次是微细脉状硅化。矿石具有碎裂状、粉末状构造。矿石中有用组分较单一,主要是金,其它元素含量少而不能被综合利用。金主要呈自然金形式存在,另有少量银金矿。自然金形态呈水滴状、蠕虫状、不规则状、棒状等,主要以晶隙金、裂隙金形式分散于脉石矿物中,少量呈包裹金产于针铁矿中,黄铁矿中金极少[6]。

3 流体包裹体特征

3.1 样品采集与测试

石英脉采自洪山杂岩体的南部边缘(见图 1),脉体产于浅褐灰色晶屑凝灰岩中,走向近 SN 向,产状近直立,脉宽 20 ~ 40 cm,具块状构造和晶洞构造,晶洞中石英晶体呈六方柱状,大部分直径小于 10 mm,个别可达 200 mm,无定向排列。石英晶体外表有黑色、褐色薄膜,内部则十分纯净。

对采集的块状石英磨制流体包裹体专用光片以分析流体温度和盐度,并粉碎挑选出纯净的石英单矿物、分选出乳白色和无色两种以分析其微量元素和 Rb、Sr 同位素。

测试分析工作在核工业北京地质研究院测试分析中心完成。流体包裹体温度和盐度测试使用 LINKAM THMS 600 型冷热台完成,测试温度范围 -

196℃ ~600℃,精度为 ±0.1℃,实验室温度22℃、湿度40%。微量元素分析使用 ELEMENT XR 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP - MS)完成,实验室温度20℃,相对湿度 30%。Rb、Sr 同位素测试使用 PHOENIX 仪器进行,室温 19℃,相对温度21%。

3.2 流体包裹体显微特征

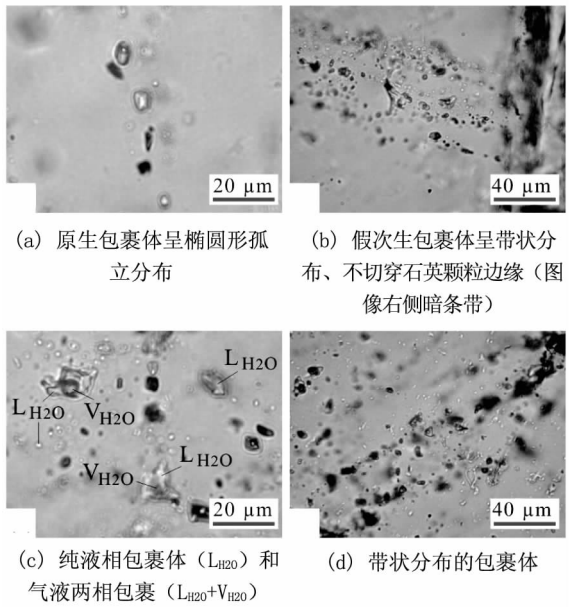
石英脉内流体包裹体极为丰富,主要呈带状分布,部分呈群体状分布,包裹体主要是呈透明无色的纯液包裹体和呈无色 - 灰色的富液包裹体,偶尔可见呈灰色 - 深灰色的气体包裹体(见图2)。包裹体直径4 ~18 μm,有原生和假次生 2 种类型。原生包裹体直径较大,呈椭圆状、孤立分布;假次生包裹体多呈长条状和不规则状,带状分布(见图2)。假次生包裹体与原生包裹体成分一致,均代表矿物晶体生长时捕获流体的特征[8]。各包裹体无子晶矿物。

3.3 流体包裹体均一温度和盐度

测试石英脉流体包裹体均一温度和盐度共计31 个。所测试包裹体均呈带状分布,包裹体为形状规则的富液包裹体,均一相态均为液相。均一温度和盐度测试结果见表1。

由表 1 可知,流体包裹体气液体积比为 20% ~30%,平均为 26%;包裹体均一温度范围是206℃ ~305℃,平均值为 254℃;流体盐度变化于7.17 ~10.19 wt% NaCl,平均值为 8.36 wt% NaCl。流体属于低盐度、低温流体。

从流体包裹体盐度 - 温度协变图(图 3(a))可以看出,包裹体的盐度明显可区分为三组。10 wt% NaCl盐度组,盐度范围为 10.04 ~10.19 wt% NaCl,平均 10.12 wt% NaCl,温度范围为 245 ~270℃,平均为 260℃;9 wt% NaCl 盐度组,其盐度范围为 8.98 ~9.13 wt% NaCl,平均为 9.06 wt% NaCl,温度范围为216℃ ~244℃,平均为229℃;盐度低于 8 wt% NaCl 组,其盐度范围为 7.17 ~7.86 wt% NaCl,平均值为 7.59 wt% NaCl,其温度变化较大,为 206℃ ~305℃,平均值为 260℃。各盐度组均一温度有一定变化范围与重叠,但各自盐度变化很小。由于流体沸腾特征不明显,包裹体盐度分组现象很可能代表了性质相近的 3 期次的热液活动记录。



(a) 原生包裹体呈椭圆形孤立分布　(b) 假次生包裹体呈带状分布、不切穿石英颗粒边缘(图像右侧暗条带)

(c) 纯液相包裹体(L_{H2O})和气液两相包裹(L_{H2O}+V_{H2O})　(d) 带状分布的包裹体

图2 石英脉流体包裹体显微照片

Fig.2 Micrographs of fluid inclusions in quartz vein

3.4 热液流体密度、温度和压力(深度)

流体密度按 H_2O - NaCl 体系由 Flincor 程序[11]计算获得,并列于表 1 中。由表 1 可见,热液流体密度变化于 0.795 ~0.922 g/cm^3,平均密度 0.872 g/cm^3。

包裹体的均一温度是在常压下测试的,一般低于捕获时流体的实际温度,应该对所得温度进行压力校正,以获得流体的捕获温度和捕获压力条件。流体包裹体形成温度和压力是紧密关联的 2 个变量,由于没有其它可利用的压力资料,在此参照根据流体包裹体盐度和均一温度估算成矿压力的经验公式[12]计算的压力作为压力校正的依据。

为校正流体包裹体的形成温度,本文使用根据人工合成石英晶体的流体包裹体资料得出的校正系数法[13]进行校正。其计算公式为

$$T_G = T_h + kP \quad (1)$$

式中,T_G - 矿物生长温度,℃;T_h - 流体包裹体均一温度测试值,℃;P - 矿物生长压力,10^5 Pa;k - 校正系数,10^{-5}℃/Pa,根据压力大小分段取值,当压力值为 190×10^5 ~400×10^5 Pa 时取0.058,当压力为 500×10^5 ~1450×10^5 Pa 时取0.071,当压力为 $1\,500\times10^5$ ~$2\,000\times10^5$ Pa 时取 0.062。

校正后的温度可代表流体包裹体的捕获温度。该温度列于表 1 中。由此可见,流体捕获温度高于包裹体均一温度 40℃ ~59℃,变化于 246℃

表 1 流体包裹体均一温度、盐度、密度、压力、pH 值和 Eh 值

Tab. 1 The homogenization temperatures, salinities, densities, captured temperature and pressures, pH and Eh values of fluid inclusions

序号	大小 /μm	气液体积比/%	均一温度/°C	盐度 /wt% NaCl	密度 /g·cm^{-3}	捕获温度/℃	捕获压力 /×10^{5}Pa	pH	Eh
1	15×12	25	273	7.73	0.842	326	729	5.94	-0.05
2	10×7	25	286	7.73	0.823	342	740	6.00	-0.09
3	13×9	30	298	7.86	0.806	356	740	6.06	-0.12
4	11×8	25	282	7.86	0.831	337	737	5.98	-0.08
5	10×7	30	305	7.86	0.795	364	738	6.10	-0.14
6	9×5	30	300	7.73	0.801	358	735	6.07	-0.13
7	13×9	25	252	7.59	0.869	301	717	5.83	0.00
8	11×7	25	267	7.59	0.849	319	727	5.91	-0.04
9	12×8	20	214	7.59	0.913	256	689	5.76	0.08
10	11×8	20	232	7.59	0.898	277	700	5.80	0.04
11	9×6	25	242	7.73	0.883	289	710	5.81	0.02
12	8×5	25	242	7.73	0.883	289	710	5.81	0.02
13	6×5	20	237	7.73	0.889	283	705	5.81	0.03
14	7×4	25	229	7.73	0.898	273	691	5.79	0.05
15	14×10	25	244	9.13	0.893	292	728	5.83	0.02
16	8×7	25	216	8.98	0.922	258	691	5.78	0.08
17	9×6	25	227	8.98	0.910	271	701	5.80	0.05
18	8×5	25	224	8.98	0.914	268	707	5.80	0.06
19	6×5	25	228	9.13	0.911	273	715	5.80	0.05
20	7×4	25	235	9.13	0.903	281	717	5.82	0.04
21	15×9	25	264	10.19	0.880	316	751	5.91	-0.03
22	13×7	25	245	10.04	0.900	293	731	5.84	0.01
23	18×6	25	247	10.04	0.898	295	728	5.85	0.01
24	11×8	25	265	10.19	0.879	317	749	5.92	-0.04
25	9×6	30	269	10.19	0.874	322	755	5.94	-0.05
26	12×5	30	270	10.04	0.871	323	752	5.94	-0.05
27	9×8	30	263	7.17	0.850	314	719	5.88	-0.03
28	10×7	20	206	7.31	0.919	246	671	5.76	0.10
29	9×6	25	242	7.31	0.879	289	708	5.81	0.02
30	8×6	30	282	7.17	0.823	337	731	5.97	-0.08
31	7×5	30	285	7.17	0.818	340	725	5.99	-0.09

~364℃,平均 303℃。

包裹体捕获压力根据其捕获温度由 Flincor 程序[11]、选择 Brown & Lamb 方程[14]重新计算,结果见表 1。由程序计算的压力比前述经验公式得出的压力变化范围大为减小,可能更符合实际压力条件。热液流体捕获压力变化于 671×10^5 ~755×10^5 Pa,平均 721×10^5 Pa。按静岩压力 300×10^5 Pa/km换算成深度,则得流体捕获深度 2.24 ~2.52 km,平均深度 2.40 km。

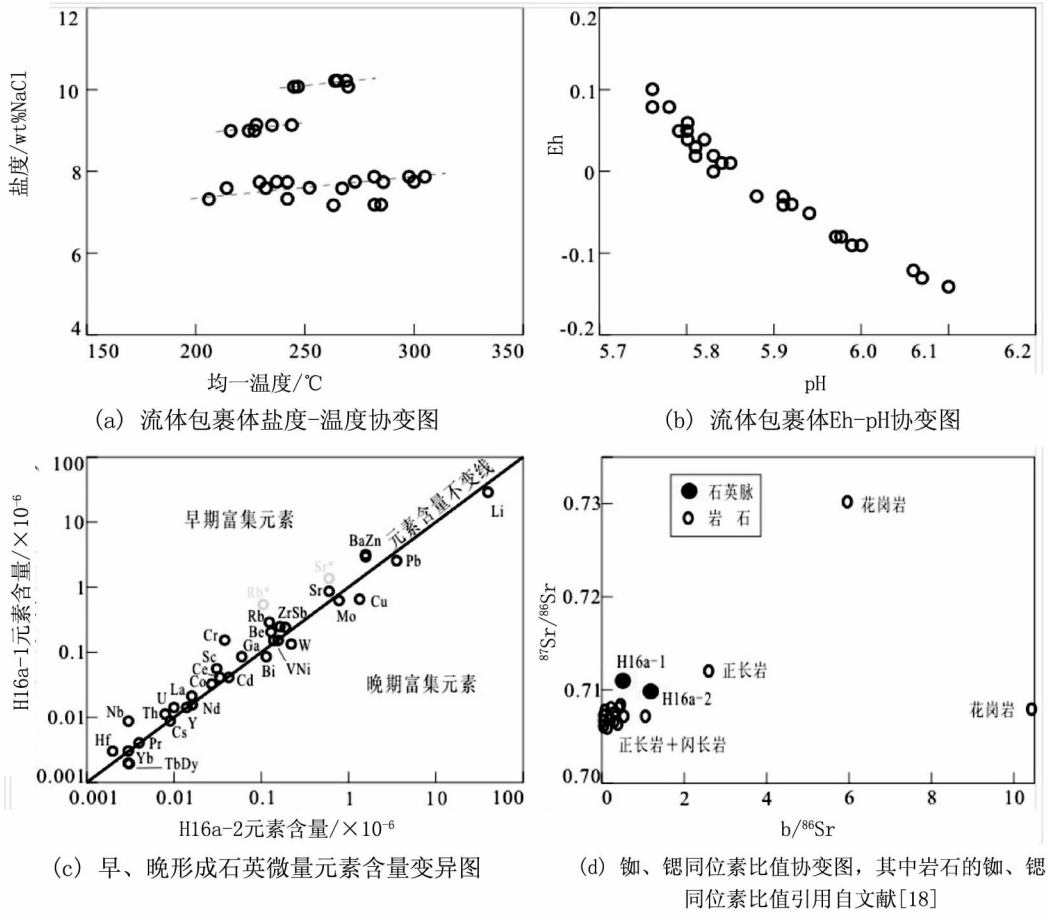
3.5 热液流体化学性质

根据包裹体捕获温度、压力、盐度条件,利用刘斌(2011)的方法可以计算热液流体的 pH 值和 Eh 值[15]。按照 H_2O - NaCl 体系,流体 pH 值、Eh 值计算结果列于表 1。

计算表明,热液流体为弱酸性、弱还原性 - 弱氧化性流体,pH 值变化于 5.76 ~6.10,平均 5.88,Eh 值变化于 -0.14 ~0.10 之间,平均值为 -0.01。Eh 值随 pH 值的升高而降低(图 3(b)),流体酸性强时具有弱氧化性,温度低、压力低时流体酸性较强。

3.6 包裹体微量元素和 Rb、Sr 同位素特征

对石英单矿物挑选了乳白色(H16a -1)和无色(H16a -2)2 个样品,进行了 44 个微量元素和 Rb、Sr 同位素的测试,结果见表 2 和表 3。由于石



(a) 流体包裹体盐度-温度协变图　(b) 流体包裹体Eh-pH协变图

(c) 早、晚形成石英微量元素含量变异图　(d) 铷、锶同位素比值协变图，其中岩石的铷、锶同位素比值引用自文献[18]

图3 流体包裹体盐度-温度、Eh-pH、石英微量元素含量、铷-锶同位素比值协变图

Fig. 3 Variation diagrams of the salinities versus homogenization temperatures, Eh versus pH for fluid inclusions, and trace elemental contents, Rb-Sr isotopes for quartz

表 2 石英脉微量元素含量($\times 10^{-6}$)测试成果表

Tab. 2 Contents of trace elements ($\times 10^{-6}$) in the quartz vein

样品号	H16a－1	H16a－2	样品号	H16a－1	H16a－2	样品号	H16a－1	H16a－2
Li	28.100	38.500	Mo	0.615	0.762	La	0.021	0.016
Be	0.206	0.130	Cd	0.041	0.042	Ce	0.041	0.033
Sc	0.055	0.031	In	<0.002	<0.002	Pr	0.004	0.004
V	0.155	0.139	Sb	0.242	0.185	Nd	0.016	0.016
Cr	0.155	0.038	Cs	0.009	0.009	Sm	0.002	<0.002
Co	0.032	0.027	Ba	3.12	1.58	Eu	<0.002	<0.002
Ni	0.153	0.158	Hf	0.003	0.002	Gd	<0.002	0.007
Cu	0.663	1.330	Ta	<0.002	<0.002	Tb	0.002	0.003
Zn	2.880	1.540	W	0.133	0.218	Dy	0.002	0.003
Ga	0.085	0.060	Re	<0.002	<0.002	Ho	<0.002	<0.002
Rb	0.288	0.124	Tl	0.003	<0.002	Er	<0.002	0.002
Sr	0.870	0.593	Pb	2.530	3.500	Tm	<0.002	<0.002
Y	0.014	0.014	Bi	0.087	0.115	Yb	0.003	0.003
Zr	0.254	0.166	Th	0.011	0.008	Lu	<0.002	<0.002
Nb	0.009	0.003	U	0.014	0.010			

表 3 石英脉 Rb、Sr 同位素测试结果

Tab. 3 Analyzed data of Rb, Sr isotopes of the quartz vein

样品号	Rb / $\times 10^{-6}$	Sr / $\times 10^{-6}$	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	stderr/ $\times 10^{-5}$
H16a - 1	0.550	1.360	1.174 5	0.709 755	1.2
H16a - 2	0.106	0.597	0.511 1	0.710 947	1.1

英中的许多微量元素主要赋存于流体包裹体中[16-17],其结果基本上可以代表热液流体的微量元素和 Rb、Sr 同位素特征。乳白色石英含有更多的流体包裹体,代表石英结晶较早和快速结晶,无色石英表明其结晶较晚和结晶速率较低的条件。

由表 2 可见,石英脉中元素 In、Ta、Re、Tl 和稀土元素 Sm、Lu 含量极低,大部分低于检测限,而其它微量元素具有一定的含量。含量大于 1×10^{-6} 的元素有 Li、Pb、Ba、Zn、Cu。在以早、晚形成的石英微量元素含量分别作为纵、横坐标对各元素投点的图解(图 3(c))上,可以了解各元素的相对增减关系。一些元素在早期形成的石英中含量高,主要有 Ba、Zn、Sr、Zr、Rb、Be、Ga、Cr、Sc、La、U、Th、Nb、Hf;另一些元素在稍晚形成的石英中含量高,主要是 Li、Pb、Cu、Mo、W、Bi、Tb、Dy;还有一些元素在早期、晚期石英中含量没有变化或变化不明显,典型的元素是 Ni、V、Cd、Nd、Y、Cs、Pr、Yb。这表明,随着热液流体温度和压力的降低和 pH、Eh 条件变化,热液流体沉淀析出了一些元素,同时又溶解了另一些元素。常见的成矿元素 Cu、Pb、Mo、W 从热液中沉淀析出需要更晚的热液阶段。

铷、锶同位素分析(表 3)表明,不同石英脉 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 比值变化较大,而 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值较一致,反映了热液流体演化中出现 Rb 的同位素分馏现象。与围岩正长岩和周边其它闪长岩类岩石[18]相比(图 3(d)),石英中铷、锶同位素比值 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 高于研究区内外主要岩浆岩,而低于区内分布很少的花岗岩和个别正长岩,反映了热液流体来源于侵入岩浆的可能性不大。

4 结论

1) 洪山矿化区南缘石英脉中发育流体包裹体主要是液相、富液相类型;均一温度 206℃ ~ 305℃,平均 254℃;盐度 7.17 ~ 10.19 wt% NaCl,平均 8.36 wt% NaCl;流体属于低温、低盐度热液。

2) 流体包裹体捕获温度 246℃ ~ 364℃,平均 303℃;压力 $671 \times 10^5 \sim 755 \times 10^5$ Pa,平均 721×10^5 Pa;捕获深度平均 2.40 km,属于浅成低温热液。

3) 热液具有弱酸性、弱氧化 ~ 弱还原性质,溶解有多种微量元素,其含量随温度、压力变化而变化,并具有高于岩浆岩的铷、锶同位素比值。

4) 热液流体主要起源于大气降水。

参考文献:

[1] 刘陶梅. 河北永年黑山门蚀变火山岩低品位含金矿石物质组成及其工业利用的可能性[J]. 黄金,1986 (4):1 - 4.

[2] 姚士新,吴良士,裴荣富. 河北邯邢地区洪山岩体地质地球化学及铜(金)矿化特征[J]. 地质与勘探,1993 (5):11 - 16.

[3] 章百明. 河北主要成矿区带与岩浆作用有关的矿床成矿系列及成矿模式[J]. 华北地质矿产杂志,1996 (3):19 - 21.

[4] 贾立芹,李玉成,赵书梅. 洪山正长斑岩蚀变矿化特征及可能存在的矿床类型探讨[J]. 硅谷,2014 (7):165 - 167.

[5] 卫万顺,张宇辉. 金矿床模型[M]. 北京:中国大地出版社,2008.

[6] 宋瑞先,王有志,王振彭,等. 河北金矿地质[M]. 北京:地质出版社,1994.

[7] 陈衍景,倪 培,范宏瑞,等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报,2007,23 (9): 2085 - 2108.

[8] 卢焕章,范宏瑞,倪 培,等. 流体包裹体[M]. 北京:科学出版社,2005.

[9] 周 凌,陈 斌. 南太行洪山正长岩体的成因和意义:锆石 SHRIMP 年代学、化学成分和 Sr - Nd 同位素特征[J]. 自然科学进展,2005,15(11):1357 - 1365.

[10] 王泽九,黄枝高,姚建新,等. 中国地层表及说明书的特点与主要进展[J]. 地球学报,2014,35(3): 271 - 276.

[11] BROWN P E. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid - inclusion data [J]. American Mineralogist,1989(74):1390 - 1393.

[12] 邵洁涟,梅建明. 浙江火山岩区金矿床的矿物包裹体标型特征研究及其成因与找矿意义[J]. 矿物岩石,1986(3):103 - 111.

[13] 赵希澂,杨先觉,黄克隆. 矿物包裹体均一法测温的压力校正[J]. 长春地质学院学报,1979 (4):150 - 156.

[14] BROWN P E,LAMB W M. P - V - T properties of fluids in the system $H_2O - CO_2 - NaCl$: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies [J].

(下转第 112 页)

不均的作用随着速度的增大而削弱。其原因是在速度较低时,增加入口速度可以增大集热管内熔盐流量,能够带走更多热量并强化换热,随着速度的提高强化换热作用遭到削弱而不够明显。

3 结论

1)半周加热下集热管壁温度存在较大梯度,热流密度越高,温度梯度越大;管内熔盐温度也存在差异,近加热面的熔盐温度高于近绝热面熔盐。集热管出口截面外壁最高温度随着入口速度的增加明显降低,最终趋于一稳定值。

2)努塞尔数 *Nu* 随着 *Re* 增大而增加,*Re* 越高换热效果越好;熔盐入口温度对换热效果影响较大,入口温度越高,*Nu* 越小;加热面热流密度对 *Nu* 数影响较小;同时,集热管绝热面 *Nu* 大于加热面。

3)集热管内壁温度周向分布不均性明显,加热面与绝热面内壁温差较大;降低热流密度和增加熔盐入口速度有助于改善周向温度不均匀性;同时,增加入口速度对改善温度不均的作用随着速度的增大而削弱。

参考文献:

[1]ROMERO M,MARCOS M J,et al. Distributed power from solar tower systems:a MIUS approach[J]. Solar Energy,1999,67(4):249 - 264.

[2]杨敏林,杨晓西,林汝谋,等. 太阳能热发电技术与系统[J]. 热能动力工程,2008,23(3):221 - 228.

[3]MILLS D. Advances in solar thermal electricity technology[J]. Solar Energy,2004(76):19 - 31.

[4]LITWIN R Z. Receiver System: Lessons Learned From Solar Two[R]. New Mexico and Livermore California:Sandia National Laboratories,Albuquerque,2002.

[5]PACHECO J E,RALPH M E,et al. Investigation of cold filling receiverpanels and piping in molten - nit - rate - salt central - receiver solar power plants[J]. Journal of Solar Energy Engineering,1994,117(4):282 - 289.

[6]JETER S M. Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation[J]. Solar Energy,1986,37(5):335 - 345.

[7]CHENG Z D,HE Y L,et al. Three - dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector[J]. International Communications in Heat & Mass Transfer,2010,37(7):782 - 787.

[8]刘 斌,吴玉庭,马重芳,等. 圆管内熔融盐强迫对流换热的实验研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(10):1739 - 1742.

[9]LIU B,WU Y T,et al. Experimental study for turbulent convective heat transfer with molten salt in a circular tube[C]//Proceedings of the International Heat Transfer Conference,Washington,DC,USA,2010.

[10]沈向阳,陆建峰,丁 静,等. 熔盐在螺旋槽管和横纹管内强化传热特性[J]. 工程热物理学报,2013,34 (6):1149 - 1152.

[11]LU J,SHEN X,et al. Convective heat transfer of high temperature molten salt in transversely grooved tube[J]. Applied Thermal Engineering,2013,61(2):157 - 162.

[12]常 春,张强强,李 鑫. 周向非均匀热流边界条件下太阳能高温吸热管内湍流传热特性研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(17):104 - 109.

[13]SHEN X,LU J,et al. Convective heat transfer of molten salt in circular tube with nonuniform heat flux[J]. Experimental Thermal & Fluid Science,2014:6 - 11.

[14]LU J,SHEN X,et al. Convective heat transfer of high temperature molten salt in transversely grooved tube[J]. Applied Thermal Engineering,2013,61(2):157 - 162.

(责任编辑 王利君)

(上接第 103 页)

Geochimica et Cosmochimica Acta,1989(53): 1209 - 1221.

[15]刘 斌. 简单体系水溶液包裹体 pH 和 Eh 的计算[J]. 岩石学报,2011,27(5):1533 - 1542.

[16]李华芹,刘家齐,杜国民. 内生金属矿床成矿作用年代学研究 - 以西华山钨矿为例[J]. 科学通报,1992, 37(12):1109 - 1112.

[17]毛光周,华仁民,龙光明,等. 江西金山金矿成矿时代探讨—来自石英流体包裹体 Rb - Sr 年龄的证据[J]. 地质学报,2008,82(4):532 - 537.

[18]CHEN B,JAHN B M,ARAKAWA Y,et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton:elemental and Sr - Nd - Pb isotopic constraints[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology,2004(148):489 - 501.

(责任编辑 王利君)