

新疆西天山喇嘛苏Cu和可克萨拉Fe-Cu矽卡岩矿床岩浆氧逸度与成矿作用

张恒 彭义伟* 叶龙刚 成都理工大学

【摘要】新疆西天山喇嘛苏Cu矿床和可克萨拉Fe-Cu矽卡岩矿床均与晚泥盆世中酸性侵入体有关,但二者矿物组合存在较大差异:喇嘛苏矿床发育大量磁黄铁矿,磁铁矿含量较少,表现出强还原的成矿环境;可克萨拉矿床发育大量磁铁矿和赤铁矿,磁黄铁矿含量较少,表现出氧化的成矿环境。本文根据两个矿床的成矿岩石主微量元素和锆石微量元素进行了锆石成因类型判别、锆石Ti温度和岩浆氧逸度计算。结果表明,喇嘛苏和可克萨拉矿床成矿岩体中岩浆锆石的Ti饱和温度分别为678~746℃和695~819℃,岩浆氧逸度分别为-11.82~-14.88和-14.92~-6.68。由此可见,喇嘛苏矿床和可克萨拉矿床的初始成矿岩体均具氧化性质,但最终热液产物却截然不同。鉴于喇嘛苏矿床赋矿围岩为碳质含量较高的灰黑色灰岩,本文推测还原性热液流体是由于高氧逸度岩浆分泌出的氧化型岩浆热液受碳质围岩的还原作用所致。可克萨拉矿床的赋矿围岩为较纯的灰白色灰岩,因此初始氧化性岩浆热液保持较长时间,沉淀出大量磁铁矿和赤铁矿,演化到晚期才逐渐转变为还原性流体并沉淀出黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等硫化物。

【关键字】喇嘛苏矿床;可克萨拉矿床;氧逸度;成矿流体演化;成矿机制

【DOI】10.12316/j.issn.1674-0831.2022.01.049

新疆西天山发育了一套斑岩-浅成低温热液-矽卡岩Au-Cu-Fe-Pb-Zn成矿系统。喇嘛苏Cu矿床和可克萨拉Fe-Cu矿床是该成矿系统中典型的矽卡岩型矿床。它们成岩成矿时代相近,但二者矿化特征差异显著:喇嘛苏发育大量磁黄铁矿、黄铜矿等硫化物,极少量磁铁矿,基本无其他金属矿物,说明矿床具还原性;可克萨拉含大量黄铜矿和磁铁矿,磁黄铁矿少量,说明矿床具氧化性。据此,本文基于详细野外地质调查和室内岩矿相鉴定,拟对成矿岩体进行锆石饱和温度和氧逸度计算,旨在查明两个矿床的成矿流体演化和氧化还原机制。

一、地质背景

喇嘛苏Cu矿床和可克萨拉Fe-Cu矿床位于新疆西天山的北部,中亚造山带西南缘。两个矿床都属于哈萨克斯坦-准噶尔板块中的准噶尔构造区,其中可克萨拉Fe-Cu矿床位于博罗科努晚古生代岛弧带,喇嘛苏Cu矿床位于赛里木地块。两矿床的东北部为准噶尔-阿拉套陆缘盆地,南部为博罗科努-可可乃克早古生代陆缘弧、伊犁石炭—二叠纪裂谷带、伊犁河盆地。

区域地层出露较为完整,元古界、古生界和新生界均有出露,中生界普遍缺失。元古界岩性主要为砂岩、泥岩、碳酸盐岩和变质岩类;古生界岩性主要为碳酸盐岩、泥岩、砂岩等;新生界,主要为砂砾岩和松散堆积物。现区内有多个深大断裂,其对成矿影响深远。区内岩浆岩发育广泛,岩浆作用强烈。前寒武岩浆岩出露较

少,主要以晚古生代侵入岩为主,且形成了多种岩体,并与区域上的斑岩型Mo-Cu矿床(如莱斯高尔-3571、达巴特)和矽卡岩型Fe-Cu-Pb-Zn矿床(如恒信、智博)有关。其中,喇嘛苏岩体分布在赛里木湖附近,为中酸性侵入体,岩性包括闪长玢岩、辉绿玢岩、斜长花岗斑岩和花岗闪长斑岩,与喇嘛苏矽卡岩Cu矿床有关。呼斯特岩体主要分布在博罗科努成矿带的中部,岩性主要为二长花岗岩、花岗闪长岩和正长花岗岩,与可克萨拉矽卡岩型Fe-Cu矿多金属矿床有关。

二、矿床地质特征

1. 喇嘛苏Cu矿床

喇嘛苏Cu矿床位于赛里木地块中部,赛里木湖的西北部,为岩浆矽卡岩型矿床,出露围岩地层主要为中元古界蓟县系库松木切克群(Jxks),其岩体主要为喇嘛苏岩体,其岩性主要为泥质灰岩、大理岩化灰岩、炭质灰岩、灰岩、大理岩等,其构造主要为断裂构造和接触带构造,起控制着矿体的形状和分布的作用。

矿区内出露岩浆岩的岩性主要为中泥盆世侵入岩中的斜长花岗斑岩和花岗闪长斑岩。矿体形态比较复杂,包括脉状、透镜状、层状、似层状等,主要受断裂控制和接触带构造。矿石类型包括磁黄铁矿—黄铜矿矿石、黄铜矿—黄铁矿矿石,矿石结构主要为交代结构、交代残余结构等,矿石构造主要为脉状、浸染状和块状构造。围岩蚀变主要有碳酸盐化、大理岩化、硅化、矽卡

岩化、绢云母化和绿泥石化等。

2. 可克萨拉Fe-Cu矿床

可克萨拉Fe-Cu矿床位于新疆西天山北部，位于博罗科努晚古生代岛弧带的东部，地处新疆精河县南部，同样为矽卡岩型矿床，出露地层主要为上奥陶统呼独克达坂组（O₃h），其岩体主要为呼斯特岩体，岩性主要为大理岩化灰岩、大理岩和灰岩，其构造主要为断裂构造和接触带构造。

矿区内岩浆岩岩性主要为二长花岗岩、正长花岗岩和花岗闪长岩，另含有少量石英闪长岩和辉长岩脉。矿体主要产于呼独克达坂组（O₃h）灰岩与呼斯特岩体二长花岗岩和花岗闪长岩的接触带部位。矿石类型包括赤铁矿、磁铁矿、黄铜矿和镜铁矿，矿石结构包括交代残余结构、交代结构、放射状结构等，矿石的构造包括脉状构造、块状构造和浸染状构造。围岩蚀变主要有碳酸盐化、大理岩化、硅化、矽卡岩化、绢云母化和绿泥石化等。

三、岩浆氧逸度特征及特征

本次实验是利用锆石中的微量元素数据并根据相关软件来进行的。其中锆石Ti温度的计算依据锆石钛温度计（Ferry and Watson, 2007），岩浆氧逸度的计算依据氧气压计（Trail et al., 2011）。锆石是中酸性岩浆中广泛存在的副矿物，具有良好的抗风化和抗热液蚀变的能力，其中变价元素Ce对氧化还原环境非常敏感，可用于探讨岩浆的氧逸度。

1. 锆石成分标型

经过计算得到，喇嘛苏矿床锆石稀土总含量（ Σ REE）平均为 1346.6×10^{-6} ，轻稀土含量（LREE）平均为 17.48×10^{-6} ，重稀土含量（HREE）平均为 1329.12×10^{-6} ，说明该地区锆石相对重稀土元素富集。（Lu/Gd）N和（Sm/La）N的平均值分别为39.17和88.07，说明锆石轻稀土之间的分异程度要强于重稀土的分异程度。U/Th为2.99，大于0.4。而且还存在强烈的Ce正异常（ δ Ce=41.41）和相对较弱的Eu负异常（ δ Eu=0.22）。据上述特征显示，该地区中的锆石均表现为典型岩浆锆石的特征。

2. 锆石Ti温度计

岩体的温度是反映岩浆性质的重要物理化学条件。锆石的Ti含量温度计简单实用，受到了广泛关注和应用。锆石的Ti含量温度计最早是由Watson等（2006）提出的，其经验公式为： $\lg Ti_{zircon} = (6.01 \pm 0.03) - (5080 \pm 30) / T (K)$ 。然后，后面的研究者又将该

经验公式进行了修改： $\lg Ti_{zircon} = (5.711 \pm 0.072) - (4800 \pm 86) / T (K) - \lg \alpha SiO_2 + \lg \alpha TiO_2$ 。

结果显示喇嘛苏矿床中样品的温度为678~746℃，均值为714℃，表明该矿床岩浆的形成温度较高，同时也可以看出锆石投点处于高氧逸度（~MH）-低氧逸度（~FMQ）之间（图1），说明岩浆锆石形成环境有较高的氧逸度，也间接说明了原始岩浆为氧化型岩浆。可克萨拉矿床中样品的温度为695~819℃，均值为788℃，表明该矿床岩浆的形成温度也较高，同时也可以看出锆石投点也处于高氧逸度（~MH）-低氧逸度（~FMQ）之间（图1），说明岩浆锆石形成环境有较高的氧逸度，原始岩浆也为氧化型岩浆。

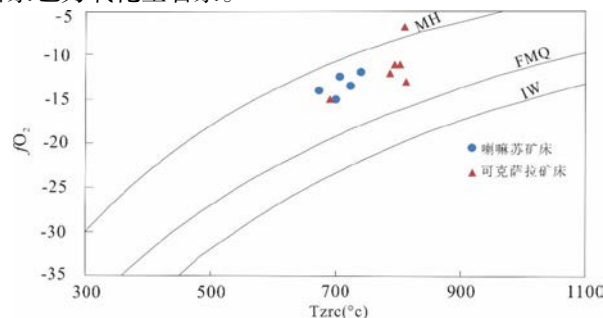


图1 喇嘛苏和可克萨拉矿床锆石的 t - $\lg fO_2$ 图解

3. 锆石氧逸度

氧逸度是区分成矿岩体与不成矿岩体的经验性指标（Ballard et al., 2002），它可反映岩浆结晶的物理化学条件。前人的研究表明锆石Ce异常与Ti温度计联合可以用来更好的反映岩浆的真实氧逸度（Trail et al., 2011, 2012）。锆石Ce氧逸度计的计算公式（Trail et al., 2011, 2012）为： $\ln (Ce/Ce^*) D = (0.1156 \pm 0.0050) \times \lg fO_2 + (13860 \pm 708) / (t + 273.15) - (6.15 \pm 0.484)$ [式中， $(Ce/Ce^*) D \approx (Ce/Ce^*)_{地壳} = Ce N / (La N \times Pr N)^{1/2}$]。采用此公式计算本次研究样品的氧逸度，在温度-氧逸度图解上（图1），喇嘛苏矿床中 $\lg fO_2$ 较为集中，样品落于-11.82~-14.88之间（均值为-13.25）；可克萨拉矿床中 $\lg fO_2$ 较为分散，样品点落于-14.92~-6.68之间（均值为-10.87）。

四、讨论与结论

1. 原始岩浆氧化还原状态

氧逸度 fO_2 (Oxygen fugacity)是指岩石物理化学的一个重要参数。对于理想气体，氧逸度等同于有效氧分压 (Oxygen partial pressure)，是指混合气体总压力之下的氧的分压力。氧逸度对岩浆成岩作用影响重大，并且在一定程度上控制了岩浆与热液成矿过程中成矿元素的活化迁移和富集成矿。对于矽卡岩型铜铁矿床，氧逸度是制约

Cu成矿的重要因素之一，Cu为亲硫元素，如果早期岩浆结晶分异过程中 S^{2-} 大量存在就会导致Cu硫化物过饱和而过早沉淀，不利于残余岩浆中Cu的迁移富集和晚阶段含Cu岩浆流体的形成，因而不利于Cu矿床的形成。而在高氧逸度条件下，岩浆中的硫不以 S^{2-} 存在，绝大多数以 SO_4^{2-} 和 SO_2 形式存在，所以只能少量形成硫化物。硫化物难以达到饱和，固无法在早期沉淀，从而利于Cu在残余岩浆中逐渐富集；而在岩浆分异后期，由于 SO_4 和 SO_2 又被还原为 S^{2-} ，便能造成Cu的大量沉淀。一般认为，氧化性岩浆能将金属元素特别是Cu元素和S元素从地幔携带到地壳浅部，多数学者的研究也证实斑岩型矿床与矿化有关的岩体氧逸度普遍较高(Sun et al., 2013; Cao et al., 2017)。

总的来说，对于斑岩型和矽卡岩型矿床，氧化环境易于成矿物质的转移富集，而还原环境易于成矿物质的沉淀。由前面分析，喇嘛苏和可克萨拉成矿岩体锆石的U/Th比值均 >0.4 ，可判断二者的锆石都为岩浆锆石，且通过 $(Sm/La)_N$ 与La含量的比值，也能间接证明了这一观点。另外，通过锆石氧逸度计也说明了两个矿床的原始岩浆均为氧化性岩浆。因此，喇嘛苏和可克萨拉两个矿床岩浆分泌出来的初始岩浆热液均具有氧化性质。但喇嘛苏Cu矿床成矿阶段发育大量磁黄铁矿，表明热液阶段成矿流体由氧化转变为强还原必定受到了外界因素的影响。

2. 流体演化与氧化还原机制

过去的大量研究表明，要形成斑岩铜矿，有利于成矿的氧逸度条件是：高的氧逸度，硫是变价元素，在高的氧逸度条件下硫以+6价硫酸盐的形式溶解于岩浆中，而在还原条件下是以-2价硫离子的形式结晶沉淀。通过分析，可克萨拉和喇嘛苏矿床原始岩浆都为高氧逸度的，后期成矿氧逸度才开始下降。

同时，根据地质勘察发现，喇嘛苏矿床多为黄铁矿和黄铜矿等还原性矿石，显示还原性特征。而可克萨拉矿床具有明显的氧化铁矿物，矿床中含有大量磁铁矿等矿石和赤铁矿矿石，显示出强氧化特征。其中，赋矿围岩的差别最大，喇嘛苏矿床围岩以灰黑色泥质灰岩为主，含大量还原性炭质物质，可克萨拉矿床围岩以灰白色灰岩为主，不含还原性物质。

据此分析，喇嘛苏矿床成矿过程主要划分为两个阶段：(1)在岩浆阶段，氧化性的岩浆从地幔区域由于压力作用向地壳运移，在运移过程中，由于为氧化性岩浆，温度较高，且从地幔区域带来大量Cu、Fe等金属元素，故在运移过程中沉淀较少；(2)在气成热液阶段，

由于岩浆慢慢转变为岩浆热液，且温度降低，在热液移动过程中，混入了某些其他物质，才导致氧化热液逐渐变为还原热液，最终形成含有大量磁黄铁矿的还原性Cu矿石。通过分析发现，喇嘛苏矿床围岩为前寒武地层，含有大量炭质，所以推断是岩浆热液混染了含碳质围岩造成的岩浆热液还原化。

相对而言，可克萨拉矿床热液成矿过程中并未受到还原性物质的影响，成矿流体的氧化性保持时间较长，在矽卡岩阶段，形成赤铁矿、磁铁矿等氧化性矿石，直到进入硫化物阶段成矿流体逐渐变为还原状态，沉淀出黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿及少量磁黄铁矿。

参考文献：

- [1]白炜.新疆西天山喇嘛苏和可克萨拉矽卡岩型铁铜矿床对比研究[D].中国地质大学(北京), 2019.
- [2]高虎.新疆精河艾木斯呆依—可克萨拉铁铜矿床地球化学特征及成因探讨[D].中国地质大学(北京), 2014.
- [3]梁贤, 张聚全, 王金贵, 张鑫全, 张立国, 王硕, 杨鑫朋, 程洲, 侯德华, 陈圆圆, 卢静.西藏冈底斯岩弧南缘晚白垩世早期石英二长闪长岩中锆石的成因矿物学研究[J].矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(01):165-177.
- [4]孙鹏.西天山喇嘛苏大型铜矿床成矿流体演化与成矿机制[D].中国地质大学(北京), 2020.
- [5]姚洪忠.岩浆岩温度和氧逸度的估算[D].合肥工业大学, 2016.
- [6]张聚全, 李胜荣, 卢静.中酸性侵入岩的氧逸度计算[J].矿物学报, 2018, 38(01):1-14.
- [7]Ferry, J.M., Watson, E.B., Newthermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 154(4):429-437.
- [8]Trail, D., Watson, E. & Tailby, N. The oxidation state of Hadean magmas and implications for early Earth's atmosphere. *Nature* 480, 2011, 79-82.

基金项目：全国大学生创新创业训练计划省级项目《项目名称》，项目编号S202010616058。

作者简介：张恒(1999—)，男，汉族，四川德阳人，学生，本科，成都理工大学地球科学学院，研究方向：地理信息方向。