

喀拉通克铜镍矿床硫同位素 组成特征及其地质意义

孙涛^{1,2}, 钱壮志^{1,2}, 党新生³, 焦建刚^{1,2}, 闫海卿^{1,2}, 王建中^{1,4}

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 新疆新鑫矿业股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830057; 4. 中国人民武装警察部队 黄金第八支队, 新疆 乌鲁木齐 830057)

摘要: 硫同位素研究在喀拉通克岩体的地壳物质混染过程中有重要意义。通过对块状和浸染状矿石、斑点状和脉状矿石以及围岩中硫化物进行硫同位素测试, 分析了黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿的硫同位素在硫化物中的富集状态, 探讨了喀拉通克铜镍矿床硫同位素组成特征及其地质意义。结果表明: 块状矿石的同位素测定值与标准值之间的千分偏差 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $(-1.30 \sim 1.84) \times 10^{-3}$, 浸染状矿石的 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $(-2.50 \sim 0.85) \times 10^{-3}$, 脉状矿石的 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $(-1.54 \sim 3.00) \times 10^{-3}$, 围岩中黄铁矿的 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $(-7.8 \sim -3.3) \times 10^{-3}$; 硫同位素在硫化物中的富集从大到小依次为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿, 说明硫化物之间基本达到了硫同位素平衡; 喀拉通克铜镍矿床的硫主要来自于地幔, 只在岩浆熔离作用形成的浸染状矿石和岩浆后期热液阶段形成的脉状矿石以及晚期黄铁矿中有少量或局部地壳硫混染的痕迹; 地壳硫的加入没有在岩浆源区发生, 可能发生在岩浆上升并发生硫化物就地熔离的局部过程中, 几乎不对硫饱和及硫化物的熔离产生影响; 岩浆在地壳深部发生的橄榄石、铬铁矿等矿物的分离结晶作用, 有可能是促使硫饱和与硫化物熔离的主要因素。

关键词: 硫同位素; 微量元素; 岩浆熔离; 铜镍矿床; 喀拉通克; 新疆

中图分类号: P618.41; P619.21⁺6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)04-0344-06

Characteristics of Sulfur Isotope in Kalatongke Cu-Ni Deposit and Its Geological Significance

SUN Tao^{1,2}, QIAN Zhuang-zhi^{1,2}, DANG Xin-sheng³, JIAO Jian-gang^{1,2},
YAN Hai-qing^{1,2}, WANG Jian-zhong^{1,4}

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Xinjiang Xinxin Mining Company Limited, Urumqi 830057, Xinjiang, China; 4. No. 8 Gold Geological Party, Chinese People's Armed Police Force, Urumqi 830057, Xinjiang, China)

Abstract: The study on sulfur isotope is of great importance to revealing the process of crustal contamination in Kalatongke mafic-ultramafic intrusion. The concentrations of sulfur isotope of chalcopyrite, pyrite, pyruhotite in massive sulfide, disseminated sulfide, speckled and veined ores and wall rocks were analyzed; and the characteristic of sulfur isotope in Kalatongke Cu-Ni deposit and its geological significance were discussed. The results showed that per thousand deviations between measured isotope and standard values $\delta(^{34}\text{S})$ of massive, disseminated, speckled and veined ores and pyrite in wall rock were $(-1.30 \sim 1.84) \times 10^{-3}$, $(-2.50 \sim 0.85) \times 10^{-3}$, $(-1.54 \sim 3.00) \times 10^{-3}$ and $(-7.8 \sim -3.3) \times 10^{-3}$, respectively; concentrations of sulfur isotope in sulfide were pyrite, pyruhotite and chalcopyrite in descending order, and it basically achieved sulfur isotope equilibrium among the sulfides; the sulfur in Kalatongke Cu-Ni deposit was mainly derived from mantle, traces of crustal sulfur contamination were little or

收稿日期: 2010-04-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40534020); 中国地质调查局项目(资[2010]矿评 01-03-17); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2010JC028; CHD2009JC058)

作者简介: 孙涛(1983-), 男, 重庆人, 理学博士研究生, 从事矿床学研究。E-mail: suntao06@126.com

partial in disseminated ores which formed in the process of magma segregation, vein ores which formed in postmagmatic hydrothermal stage, and pyrite which formed in postmagmatic later stage; the crust-derived sulfur did not enter into the magma source zone, it would be partly occur in the process of the magma rising and sulfide segregation in situ, almost had little affect on sulfur saturation and sulfide segregation; the fractional crystallization of olivine and chromite occurred in deep crustal magma may be the major factor to promote sulfur saturation and sulfide segregation.

Key words: sulfur isotope; minor element; magma segregation; Cu-Ni deposit; Kalatongke; Xinjiang

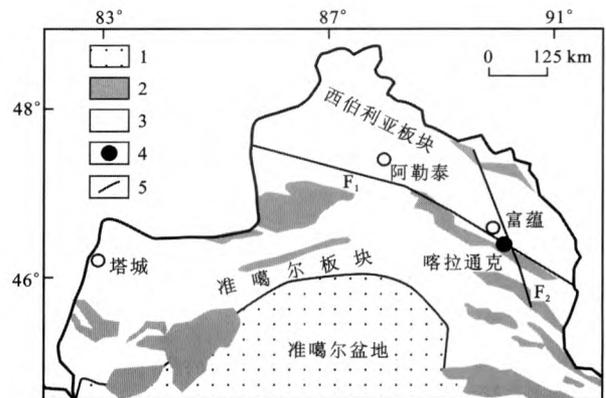
0 引言

在岩浆硫化物矿床中,不同物质来源的矿床硫同位素组成极不相同。在幔源岩浆(主要以 MORB 为例)和沉积岩石中硫化物或硫酸盐矿物的同位素测定值与标准值之间的千分偏差 $\delta(^{34}\text{S})$ 差别相对很大,所以硫同位素研究在岩浆混染过程中有很重要意义^[1]。研究显示,喀拉通克铜镍矿床原生岩浆为亏损的软流圈地幔经部分熔融形成的 MgO 含量很高的玄武质岩浆,其成矿物质主要来源于地幔^[2-3],且岩体遭受了地壳物质的混染^[2-8];但是,地壳物质的混染既可以通过俯冲作用在岩浆源区发生,也可以在岩浆上升过程中以及岩浆房中发生^[9]。喀拉通克岩体的地壳物质混染是与俯冲作用有关还是在岩浆上升过程中发生,抑或是两种作用兼而有之?笔者试图通过不同矿石类型硫同位素组成进一步探讨该矿床的成矿物质来源,并利用硫同位素对地壳混染作用进行示踪。

1 矿床地质与矿相学特征

喀拉通克铜镍矿床位于新疆维吾尔自治区富蕴县县城东南 28 km 处,大地构造位置为准噶尔板块北缘、二台断裂带与额尔齐斯断裂带交汇点南西侧(距两断裂的距离分别为 20 km 和 15 km),南距乌伦古断裂带约 50 km(图 1)。矿区共有 11 个镁铁质岩体,可根据岩体产状与分布分为南北 2 个岩带:Y₄~Y₉ 岩体组成北岩带;Y₁~Y₃ 岩体位于南岩带,是主要的含矿岩体;Y₁₁ 和 Y₁₀ 位于南岩带的南侧(图 2a)。岩体侵位于下石炭统南明水组中上段,围岩主要为含炭质细—粗屑沉凝灰岩,夹炭质板岩、含砾沉凝灰岩。发育的铜镍硫化物矿床主要有 I~III 号矿床,分别对应分布在 Y₁~Y₃ 岩体中,Y₁ 岩体几乎全岩矿化,已探明为大型铜镍矿床;在 Y₂ 和 Y₃ 岩体中矿体主要分布于岩体中下部,赋存有中型铜镍矿床(II、III 矿体)^[10]。

依据成因,该矿床矿石构造主要为 3 种:就地熔离作用形成的浸染状构造(包括稠密浸染状、中等浸



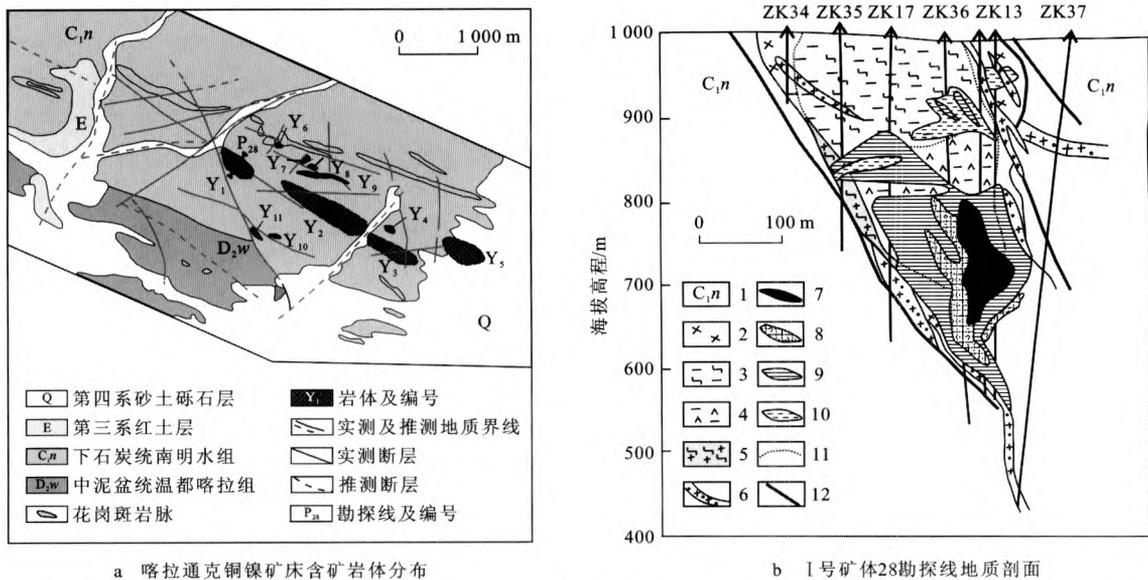
1—中生代—新生代盖层;2—石炭纪—二叠纪地层;3—前石炭纪构造层;4—铜镍矿床;5—断层;F₁—额尔齐斯断裂带;F₂—二台断裂带;据 Mao 等^[11]修改

图 1 喀拉通克铜镍矿床大地构造位置

Fig. 1 Tectonic Location of Kalatongke Cu-Ni Deposit

染状、稀疏浸染状)、斑点状构造;深部熔离矿浆贯入作用形成的块状构造;热液作用形成的脉状构造。另外,还有表生风化作用形成的土状、粉末松散状构造等。其中块状矿石主要分布在 I 矿体中和 II 矿体西段下部以及两岩体之间^[2];稠密浸染状矿石主要分布在 I~III 矿体中;中等浸染状和稀疏浸染状矿石在 I~IX 矿体中均有不同程度分布,脉状矿石主要由黄铁矿细脉组成,在 I~IX 矿体中均可见到。各类矿石在空间接触关系上,表现为块状矿石贯入于各类浸染状矿石中^[2],而浸染状矿石之间则呈过渡关系(图 2b)。脉状矿石常与构造破碎有关,与块状矿石呈直接接触关系,与浸染状矿石呈快速过渡接触。矿石结构按其形成条件可划分为 3 组:从熔体和热液中结晶形成的自形晶结构、半自形粒状结构、半自形—它形粒状结构组(图 3a、b);固熔体分离作用形成的乳浊状结构(图 3c)、结状结构、叶片状结构组;交代溶蚀作用形成的交代溶蚀结构、交代残余结构组(图 3d、e)。

不同类型矿石中已发现的矿石矿物有 50 余种^[10],其中主要矿物成分为磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿;次要矿物有磁铁矿、紫硫镍矿、钛铁矿;少量的闪锌矿、硫锰矿、方铅矿、墨铜矿、斑铜矿、



1—下石炭统南明水组; 2—淡色辉长岩; 3—黑云角闪苏长岩; 4—橄榄苏长岩; 5—黑云角闪辉长岩; 6—辉长岩脉; 7—块状矿; 8—中等及稠密浸染状矿; 9—稀疏浸染状矿; 10—矿化体; 11—岩相界线; 12—断层; 据王润民等^[10]修改

图 2 喀拉通克铜镍矿床地质特征

Fig. 2 Geologic Characteristics of Kalatongke Cu-Ni Deposit

铁铜蓝、方钴矿、锌铜矿等;极微量的铬铁矿、碲镍铂钨矿、砷铂矿、碲钨矿、等轴碲钨矿、碲钨矿等^[2]。在主要矿石矿物中,磁黄铁矿常与镍黄铁矿形成固溶体分离的乳浊状结构(图 3c),也常交代溶蚀黄铁矿、磁铁矿形成交代溶蚀结构(图 3a),在镍黄铁矿边缘或裂隙偶见有蚀变生成的紫硫镍矿微粒。黄铜矿常交代磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿形成交代溶蚀结构(图 3b、d、e),接触边界不规则。黄铁矿可以分为早、晚两个世代,早期黄铁矿多呈自形晶、半自形晶,常被磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿交代溶蚀(图 3a、b),接触边缘一般较规则;晚期黄铁矿主要以它形晶、细脉状产出,粒度极细小,常呈星点状、细脉(网脉)状分布于脉石矿物中(图 3f)。

2 分析方法

笔者对块状和浸染状矿石、斑点状和脉状矿石以及围岩中的硫化物均进行了硫同位素和电子探针微区分析。硫同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所稳定同位素实验室完成。人工选取新鲜矿石和岩石样品,破碎过筛;硫化物是在双目镜下人工挑选,纯度 98%。样品以 Cu_2O 作氧化剂制备测试样品,用 MAT-251 质谱仪测定,采用 VCDT 国际标准,分析精度好于 0.2%。

3 硫同位素组成特征及其地质意义

喀拉通克铜镍矿床的硫同位素组成特征见

表 1。其中,23 件黄铁矿的 $\delta(^{34}S)$ 为 $(-1.8 \sim 3.0) \times 10^{-3}$,平均值为 0.42×10^{-3} ;53 件磁黄铁矿的 $\delta(^{34}S)$ 为 $(-2.40 \sim 1.84) \times 10^{-3}$,平均值为 0.05×10^{-3} ;30 件黄铜矿的 $\delta(^{34}S)$ 为 $(-2.50 \sim 0.84) \times 10^{-3}$,平均值为 -0.16×10^{-3} 。硫同位素在硫化物中的富集从大到小依次为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿,说明硫化物之间基本达到了硫同位素平衡。

53 件块状矿石中硫化物(黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿)的 $\delta(^{34}S)$ 为 $(-1.30 \sim 1.84) \times 10^{-3}$ (表 1),样品全部处在陨石硫同位素组成范围内 $(-2 \sim 2) \times 10^{-3}$;43 件浸染状矿石中有 40 件硫化物样品 $\delta(^{34}S)$ 在 $(-2 \sim 2) \times 10^{-3}$ 内,有 3 件样品(2 件磁黄铁矿,1 件黄铜矿)的 $\delta(^{34}S)$ 小于 -2×10^{-3} ;晚期黄铁矿以及脉状矿石中硫化物的 $\delta(^{34}S)$ 大多数在 $(-2 \sim 2) \times 10^{-3}$ 内,有 2 件样品(黄铁矿)大于 2×10^{-3} ;围岩中黄铁矿的 $\delta(^{34}S)$ 为 $(-7.8 \sim -3.3) \times 10^{-3}$,没有一件样品的 $\delta(^{34}S)$ 处于陨石硫范围(图 4)。幔源硫的 $\delta(^{34}S)$ 通常被认为是 $(-2 \sim 2) \times 10^{-3}$ ^[1]。

以上硫同位素特征表明,喀拉通克铜镍矿床的硫主要来自于地幔。从图 4 可以看出,只在岩浆熔离作用形成的浸染状矿石和岩浆后期热液阶段形成的脉状矿石以及晚期黄铁矿中有地壳硫混染的痕迹,而由贯入作用形成的块状矿石中没有地壳硫的成分。如果地壳混染作用发生在岩浆源区,那么形成的所有类型矿石中都应该具有地壳硫的组成特

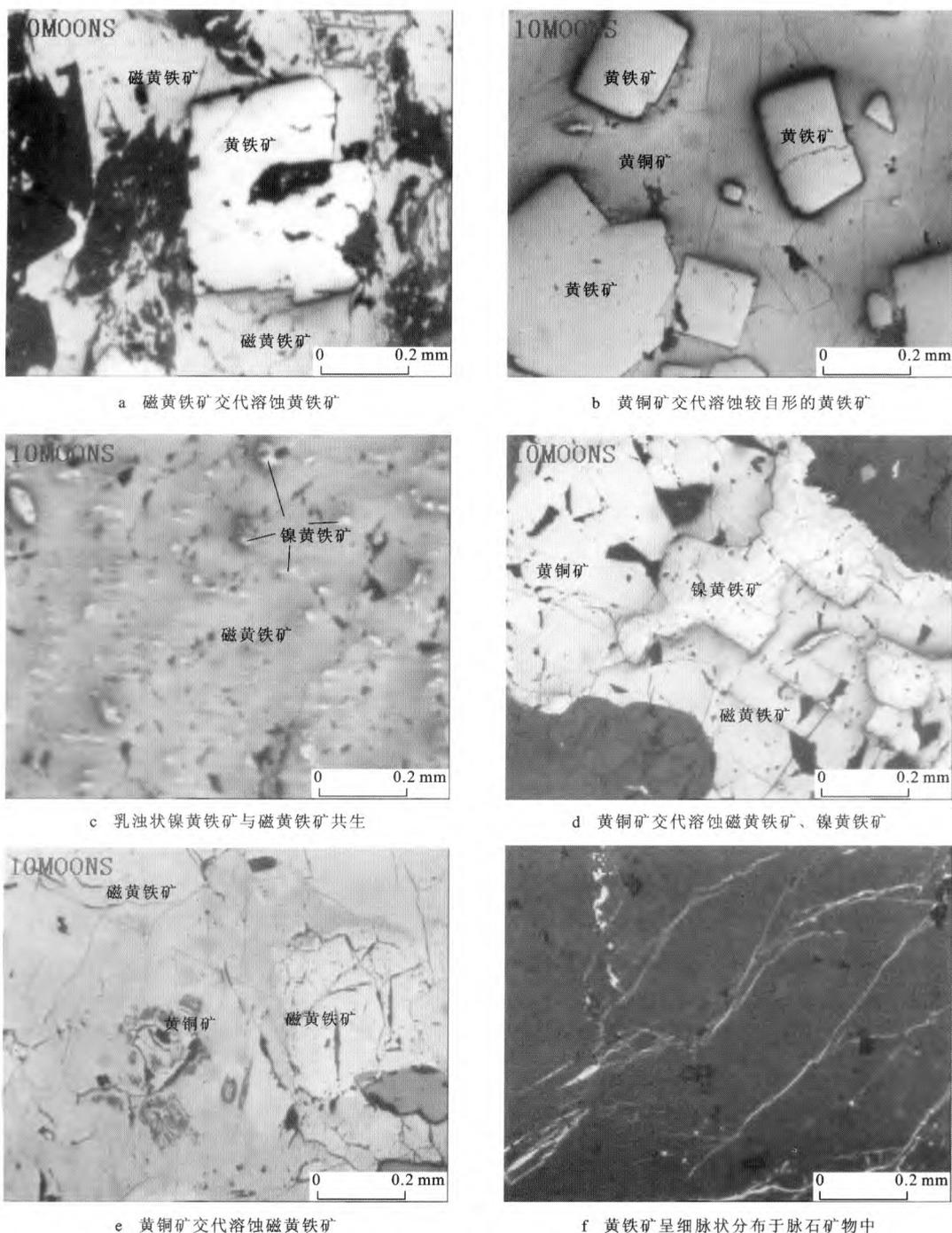


图3 喀拉通克铜镍矿中矿石矿物之间的关系

Fig. 3 Relation Diagram of Ore Mineral in Kalatongke Cu-Ni Deposit

征,但是喀拉通克矿床块状矿石中硫同位素没有地壳硫的组成($(-1.30 \sim 1.84) \times 10^{-3}$),也没有围岩硫的组成特征($(-7.8 \sim -3.3) \times 10^{-3}$),表明地壳物质的混染没有在岩浆源区发生,可能发生在岩浆到达地壳一定深度(相当于深部岩浆房)之后,岩浆(此时岩浆即为常说的母岩浆)再继续上升并发生硫化物就地熔离的局部过程中;另外,在后期的热液蚀变过程中,也可能有地壳流体的加入。在岩浆型

Cu-Ni-(PGE)硫化物矿床的成矿过程中,多数矿床有地壳物质的混入,构成引发硫饱和的重要因素之一^[12-16]。但是,在喀拉通克矿床中,仅在硫化物熔离的局部过程和热液阶段有极少量地壳物质加入,几乎不对硫饱和及硫化物的熔离产生影响。岩浆在地壳深部发生的橄榄石、铬铁矿等矿物的分离结晶作用,有可能是促使硫过饱和与硫化物熔离的主要因素^[2]。所以,在探讨硫饱和与硫化物熔离过程时,应

表 1 喀拉通克铜镍矿床硫同位素组成

Tab. 1 Sulfur Isotope Composition of Kalatongke Cu-Ni Deposit

样品编号	样品类型	测试对象	$\delta(^{34}\text{S})/10^{-3}$	样品编号	样品类型	测试对象	$\delta(^{34}\text{S})/10^{-3}$
162/24-293	块状矿石	磁黄铁矿	0.59	3-44	浸染状矿石	黄铜矿	-0.36
162/24-293	块状矿石	黄铜矿	0.40	35-90	浸染状矿石	磁黄铁矿	-0.59
162/24-302	块状矿石	磁黄铁矿	0.71	35-90	浸染状矿石	黄铜矿	0.34
162/24-302	块状矿石	黄铜矿	0.50	160/26-345	浸染状矿石	黄铁矿	0.85
162/24-311	块状矿石	黄铁矿	1.41	160/26-345	浸染状矿石	磁黄铁矿	0.16
162/24-311	块状矿石	磁黄铁矿	0.71	160/26-239	浸染状矿石	黄铁矿	0.83
162/24-341	块状矿石	黄铁矿	1.59	160/26-239	浸染状矿石	磁黄铁矿	0.27
162/24-341	块状矿石	磁黄铁矿	-0.25	160/26-239	浸染状矿石	黄铜矿	-0.42
162/24-352	块状矿石	黄铁矿	0.16	160/26-248	浸染状矿石	黄铁矿	0.84
162/24-352	块状矿石	磁黄铁矿	0.00	160/26-248	浸染状矿石	磁黄铁矿	-0.14
159/26-292	块状矿石	黄铁矿	1.59	162/30-197	浸染状矿石	黄铁矿	0.25
159/26-292	块状矿石	磁黄铁矿	-0.26	162/30-197	浸染状矿石	黄铜矿	-0.71
159/26-292	块状矿石	黄铜矿	-0.30	152/30-293	浸染状矿石	磁黄铁矿	0.80
159/26-343	块状矿石	黄铁矿	0.18	152/30-293	浸染状矿石	黄铜矿	-1.51
159/26-343	块状矿石	磁黄铁矿	0.03	168/32-173	浸染状矿石	黄铁矿	0.65
159/26-347	块状矿石	磁黄铁矿	0.17	168/32-173	浸染状矿石	磁黄铁矿	0.53
159/26-347	块状矿石	黄铜矿	-0.25	202/27-486	浸染状矿石	磁黄铁矿	0.25
159/26-344	块状矿石	黄铁矿	0.85	202/27-608	浸染状矿石	磁黄铁矿	0.37
159/26-344	块状矿石	磁黄铁矿	0.46	CM-406	浸染状矿石	磁黄铁矿	-0.57
160/26-291	块状矿石	黄铜矿	0.64	CM-406	浸染状矿石	黄铜矿	-1.02
160/26-291	块状矿石	磁黄铁矿	0.82	19-72	浸染状矿石	磁黄铁矿	-0.24
160/26-330	块状矿石	黄铁矿	1.43	19-72	浸染状矿石	黄铜矿	-0.34
160/26-330	块状矿石	磁黄铁矿	0.88	3-25	浸染状矿石	磁黄铁矿	0.62
157/28-268	块状矿石	磁黄铁矿	0.79	3-25	浸染状矿石	黄铜矿	0.04
157/28-268	块状矿石	黄铜矿	0.60	71-66	浸染状矿石	磁黄铁矿	-0.42
157/28-290	块状矿石	磁黄铁矿	1.20	71-66	浸染状矿石	黄铜矿	0.03
157/28-290	块状矿石	黄铜矿	-0.34	71-76	浸染状矿石	磁黄铁矿	-0.29
157/28-293	块状矿石	黄铁矿	1.25	71-76	浸染状矿石	黄铜矿	-0.27
157/28-293	块状矿石	磁黄铁矿	-0.34	KL II -2/1	浸染状矿石	黄铁矿	-1.80
157/28-304	块状矿石	磁黄铁矿	1.10	KL II -7/1-1	浸染状矿石	黄铁矿	-1.80
157/28-304	块状矿石	黄铜矿	-0.16	KL II -7/1-2	浸染状矿石	黄铜矿	0.40
157/28-330	块状矿石	磁黄铁矿	0.80	KL II -7/1-3	浸染状矿石	磁黄铁矿	-2.4
157/28-330	块状矿石	黄铜矿	0.62	KL II -5/1	浸染状矿石	黄铁矿	0.10
13/28-275	块状矿石	磁黄铁矿	1.27	KL II -5/2	浸染状矿石	黄铜矿	0.30
13/28-275	块状矿石	黄铜矿	0.84	KL II -5/3	浸染状矿石	磁黄铁矿	-1.20
3-7	块状矿石	磁黄铁矿	0.31	ZK6701K-1/1	浸染状矿石	黄铁矿	-1.60
3-7	块状矿石	黄铜矿	0.74	ZK6701K-1/3	浸染状矿石	磁黄铁矿	-2.00
35-94	块状矿石	磁黄铁矿	-0.26	ZK6701K-2/1	浸染状矿石	C 黄铁矿	-2.50
35-94	块状矿石	黄铜矿	-0.69	ZK6701K-2/2	浸染状矿石	磁黄铁矿	-0.90
35-94	块状矿石	黄铁矿	-1.12	ZK6701K-3/1	浸染状矿石	黄铁矿	-1.50
CM-407	块状矿石	黄铜矿	-0.20	ZK6701K-3/3	浸染状矿石	磁黄铁矿	-1.70
CM-407	块状矿石	磁黄铁矿	-0.35	ZK8302K-2/1	浸染状矿石	磁黄铁矿	-2.10
152/30-316	块状矿石	磁黄铁矿	0.03	164/20-337	斑点状矿石	磁黄铁矿	0.32
238/3-485	块状矿石	磁黄铁矿	0.35	164/20-350	脉状矿石	黄铁矿	0.43
238/3-495	块状矿石	磁黄铁矿	0.35	160/20-310	脉状矿石	磁黄铁矿	-0.50
13/28-280	块状矿石	磁黄铁矿	1.72	60/32-342	脉状矿石	磁黄铁矿	-1.50
13/28-340	块状矿石	磁黄铁矿	1.84	152/30-243	脉状矿石	磁黄铁矿	0.80
13/28-340	块状矿石	黄铜矿	1.50	152/30-243	脉状矿石	黄铜矿	-1.54
151/30-344	块状矿石	磁黄铁矿	0.53	157/28-218	脉状矿石	磁黄铁矿	0.36
151/30-344	块状矿石	黄铜矿	0.16	168/26-343	晚期粗粒	黄铁矿	3.00
KL II -15/1	块状矿石	黄铁矿	-0.50	159/26-289	晚期粗粒	黄铁矿	2.54
KL II -15/2	块状矿石	黄铜矿	-1.30	152/30-236	安山岩	黄铁矿	-3.30
KL II -15/3	块状矿石	磁黄铁矿	-0.20	36/28-410	沉凝灰岩	黄铁矿	-3.49
3-44	浸染状矿石	磁黄铁矿	-0.59	ZK8302-32/1	沉凝灰岩	黄铁矿	-7.8

注:样品编号以 K 和 Z 开头的样品为本文测试,其余数据引自王润民等^[10]

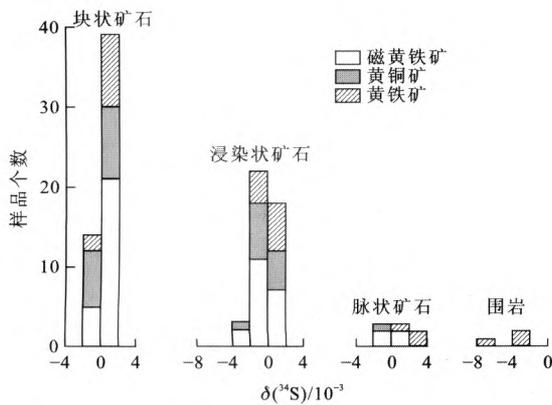


图4 喀拉通克铜镍矿床不同矿石硫同位素组成分布

Fig. 4 Sulfur Isotope Distribution of Different Ores in Kalatongke Cu-Ni Deposit

该更加关注岩浆自身的特点及岩浆演化过程^[3]。

4 结语

(1)喀拉通克铜镍矿床硫同位素在硫化物中的富集从大到小依次为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿,说明硫化物之间基本达到了硫同位素平衡。

(2)块状矿石、浸染状矿石、脉状矿石以及围岩中硫化物的硫同位素组成特征表明,硫主要来自于地幔,只在岩浆熔离作用形成的浸染状矿石和岩浆后期热液阶段形成的脉状矿石以及晚期黄铁矿中有少量或局部地壳硫混染的痕迹。

(3)地壳硫的加入没有在岩浆源区发生,可能在岩浆上升并发生硫化物就地熔离的局部过程和热液阶段发生,几乎不对硫饱和及硫化物熔离产生影响。

本项研究在汤中立院士指导下完成,电子探针测试得到了长安大学刘民武老师的帮助;野外工作中到了喀拉通克铜镍矿王勇、王斌等和新疆地矿局第四地质大队周刚、杨文平、何永胜等以及长安大学田战武、潘振兴、赵玉梅等研究生的大力帮助。在此一并谢忱。

参考文献:

- [1] Ripley E M, Li C S. Applications of Stable and Radiogenic Isotopes to Magmatic Cu-Ni-PGE Deposits: Examples and Cautions[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 124-131.
- [2] 钱壮志, 王建中, 姜常义, 等. 喀拉通克铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其成矿作用意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(4): 832-844.
- [3] 姜常义, 夏明哲, 钱壮志, 等. 新疆喀拉通克镁铁质岩体群的岩石成因研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(4): 749-764.
- [4] 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(3): 217-224.
- [5] 张作衡, 柴凤梅, 杜安道, 等. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测年及成矿物质来源示踪[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(4): 285-293.
- [6] 韩春明, 肖文交, 赵国春, 等. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素研究及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 163-170.
- [7] Zhang Z C, Mao J W, Chai F M, et al. Geochemistry of the Permian Kalatongke Mafic Intrusions, Northern Xinjiang, Northwest China: Implications for the Genesis of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(2): 185-203.
- [8] 王建中, 钱壮志, 董富权, 等. 中国西部典型铜镍矿床亲铜元素特征对比[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(2): 137-143.
- [9] 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 阿尔泰造山带南缘镁铁质-超镁铁质杂岩体的 Sr、Nd、O 同位素地球化学及其源区特征探讨[J]. *地质论评*, 2006, 52(1): 38-42.
- [10] 王润民, 赵昌龙. 新疆喀拉通克一号铜镍硫化物矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [11] Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, et al. A Review of the Cu-Ni Sulphide Deposits in the Chinese Tianshan and Altay Orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal Characteristics and Ore-forming Processes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2/4): 184-203.
- [12] Naldrett A J, Lightfoot P C. Ni-Cu-PGE Deposits of the Noril'sk Region, Siberia: Their Formation in Conduit for Flood Basalt Volcanism[R]. St John's: Geological Association of Canada, 1999.
- [13] Naldrett A J, Asif M, Schandl E, et al. Platinum-group Elements in the Sudbury Ores: Significance with Respect to the Origin of Different Ore Zones and to the Exploration for Foot-wall Orebodies[J]. *Economic Geology*, 1999, 94(2): 185-210.
- [14] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [15] 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 等. 中国镍铜铂族岩浆矿床矿产空间数据库建设及其开发应用[J]. *地球科学与环境学报*, 2007, 29(1): 22-26.
- [16] 李文渊. 岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床研究现状及发展趋势[J]. *西北地质*, 2007, 40(2): 1-28.