

## 广东信宜东田金矿床稀土元素地球化学研究

曹建劲<sup>1, 2, 3\*</sup>

(1. 中山大学地球科学系, 广东广州 510275; 2. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室, 贵州贵阳 550002; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**云开隆起区分布有众多的金、银、钨、锡、铅、锌、钼、铁等金属矿床, 是两广地区重要的成矿区之一。本文选择分布于隆起区腹部的信宜东田金矿床作为研究对象, 对比研究该矿床含金石英脉、蚀变片麻岩型矿石、加里东期片麻状黑云母花岗岩、燕山晚期花岗斑岩的稀土元素分配模式, 以及  $\Sigma\text{REE}$ ,  $\text{LREE}$ ,  $\text{HREE}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE}$ ,  $\delta_{\text{Eu}}$ ,  $\delta_{\text{Ce}}$ ,  $N_{\text{La}/\text{Yb}}$ ,  $N_{\text{La}/\text{Sm}}$  等参数。结果表明含金石英脉与蚀变片麻岩型矿石的成矿物质来源相同, 均来源于区内广泛分布的片麻状黑云母花岗岩, 成矿时代应为加里东期。

**关键词:**地球化学; 金矿; 稀土**中图分类号:** P618.51; P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4343(2004)02-0275-05

云开隆起区地理位置处于粤西及桂东南一带, 大地构造位置属华南加里东褶皱系(黄汲清, 1977), 云开隆起区分布有众多的金、银、钨、锡、铅、锌、钼、铁等金属矿床, 是两广地区重要的成矿区之一。关于分布于隆起区腹部信宜、罗定一带的东田金矿床、白马金银矿床、三叉坳金矿床、替架金矿床等一批金属矿床的物质来源和成矿时代, 以往的观点认为其成矿物质来源与燕山晚期岩浆岩有关, 成矿时代为燕山晚期<sup>[1]</sup>。本文选择信宜东田金矿床作为研究对象, 在对比研究其中的矿石及各种岩石稀土元素特征的基础上, 探讨了该矿床的成矿物质来源和成矿时代等问题。

## 1 矿床地质概况

东田金矿床位于广东省信宜县合水镇(图1), 处于云开隆起区中段, 是90年代发现的中型金矿床。矿区发育片麻状黑云母花岗岩, 以及元古界黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩等。片麻状黑云母花岗岩的成岩年龄在424~512 Ma之间(莫柱孙, 1980; 林庆华, 1989; 符力奋, 1995)。矿区之北西面有银岩燕山晚期花岗斑岩出露(成岩年龄为78.10~92.27 Ma。据俞受璠, 1990), 而呈岩脉产出的燕山晚期白鸡坳花岗斑岩分布于矿区正西方向



图1 东田金矿床地理位置图

12 km处。区内北西向断裂带为该矿床的控矿构造。该断裂带经历过两期动力变质作用, 早期为韧性变形, 晚期为脆性变形。两条北东向断裂切断矿体, 为成矿后构造。金矿带呈北西向分布, 长3~4 km, 宽200~300 m。矿体严格受北西向断裂带控制, 其产状与断裂带基本一致, 总体倾向南西220°左右, 倾角30°~50°。矿体呈似层状或脉状近似平行产出, 常有膨胀收缩、波状弯曲等现象。单个矿体厚度为0.85~2.2 m, 平均厚度1.3 m, 金矿平均品位大于 $5 \times 10^{-6}$ , 最高品位 $24 \times 10^{-6}$ 。在矿体厚度变化较大部位, 以及波状弯曲的矿体倾角由缓变陡处, 含金较高。矿石类型有蚀变片麻岩型和

收稿日期: 2002-09-26; 修订日期: 2002-11-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程(KZCX2-102)和国家自然科学基金(40273027)联合资助项目

作者简介: 曹建劲(1958-), 男, 广西合浦人, 副教授; 研究方向: 地球化学

\* 通讯联系人(E-mail: eescjj@zsu.edu.cn)

含金石英脉型,后者含金较高。矿石矿物以自然金为主,次为银金矿、金银矿、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿和少量金锑化物、闪锌矿等。伴生组分 Ag, Cu, Pb, Zn, Bi, Sb, Mn, Co, Ni 等含量较低,无综合利用价值。Au 与 S 呈正相关,与 Ag, Ba, V 等则呈负相关。自然金一般为次圆粒状、树枝状或薄膜状,粒度 0.01~0.04 cm。银金矿、金银矿和金锑化物呈它形粒状或不规则状。金矿物的产出形式有 3 种:① 裂隙金。嵌布于石英、黄铁矿、黄铜矿等矿物的裂隙中;② 晶隙金。嵌布于石英、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿等矿物晶体间隙中;③ 包裹金。以石英包裹为主,硫化物次之。可将成矿过程划分为 4 个阶段:(1) 石英-黄铁矿阶段,形成乳白色块状石英和少量粗晶黄铁矿;(2) 自然金-石英-黄铁矿、黄铜矿阶段,形成浅灰色或烟灰色石英、细粒黄铁矿、黄铜矿和自然金及少量银金矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黝铜矿等;(3) 石英-绿泥石-黄铁矿阶段;(4) 石英-碳酸盐阶段,不含金,呈细脉状分布。其中,第二阶段为金的主要成矿阶段。围岩蚀变分布较广泛,主要有硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化。其中硅化与成矿的关系最密切,硅化越强,则矿化越强。在空间上可分为内、中、外 3 个蚀变带:内带以强烈硅化、黄铁矿化为主;中带以硅化为特征;外带以绢云母化、绿泥石化为主,硅化次之。

## 2 稀土元素地球化学特征

### 2.1 含金石英脉稀土元素特征

从表 1 可见,含金石英脉稀土总量较低, $\Sigma\text{REE}$ 在  $13.99 \times 10^{-6} \sim 64.38 \times 10^{-6}$  之间(采样位置见图 2),其中 LREE:  $11.05 \times 10^{-6} \sim 47.38 \times 10^{-6}$ , HREE:  $4.30 \times 10^{-6} \sim 7.00 \times 10^{-6}$ 。Eu 亏损明显,  $\delta_{\text{Eu}}$ : 0.52~0.86, 平均 0.70。Ce 具有较弱的负异常,  $\delta_{\text{Ce}}$ : 0.80~0.89, 平均 0.84。在球粒陨石标准化配分模式图上为 3 条平行的轻稀土富集型曲线,但所有样品的曲线都在蚀变片麻岩型矿石曲线的下面(图 3, 标准化采用 Leedy 球粒陨石数据)。LREE/HREE: 6.77~8.25, 平均 7.60。 $N_{\text{La/Yb}}$ : 7.89~20.75, 平均 13.59。轻、重稀土分异程度没有明显差别,  $N_{\text{La/Sm}}$ : 2.42~3.17, 平均 2.87,  $N_{\text{Gd/Yb}}$ : 1.40~3.26, 平均 2.41。

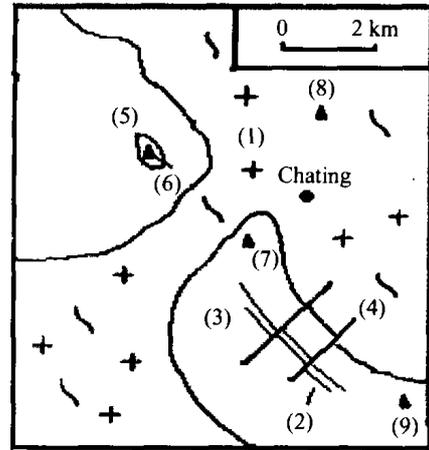


图 2 东田金矿区采样地点分布图

(1) 片麻状黑云母花岗岩;(2) 金矿体, B04, B05, B06 样品采于其中的蚀变片麻岩型矿石, B07, B08, B09 样品采于其中的含金石英脉;(3) 元古界变质岩;(4) 北东向断裂;(5) 银岩燕山晚期花岗斑岩;(6) Y302-1 采样点;(7) B02 采样点;(8) B03 采样点;(9) B01 采样点

### 2.2 蚀变片麻岩型矿石稀土元素特征

蚀变片麻岩型矿石稀土总量远高于含金石英脉,  $\Sigma\text{REE}$  在  $276.48 \times 10^{-6} \sim 280.78 \times 10^{-6}$  之间, 其中 LREE:  $166.94 \times 10^{-6} \sim 235.26 \times 10^{-6}$ , HREE:  $22.68 \times 10^{-6} \sim 49.07 \times 10^{-6}$ 。 $\delta_{\text{Eu}}$  较含金石英脉高, 蚀变片麻岩型矿石  $\delta_{\text{Eu}}$  比含金石英脉  $\delta_{\text{Eu}}$  为 0.78~0.87(平均 0.82): 0.52~0.86(平均 0.70)。 $\delta_{\text{Ce}}$  弱低于含金石英脉, 蚀变片麻岩型矿石  $\delta_{\text{Ce}}$  比含金石英脉  $\delta_{\text{Ce}}$  为 0.78~0.81(平均 0.79): 0.80~0.89(平均 0.84)。在球粒陨石标准化配分模式图上为一组平行而且距离较近的轻稀土富集型曲线, LREE/HREE: 3.40~10.37, 平均 7.34。 $N_{\text{La/Yb}}$ : 3.95~16.62, 平均 11.11。轻、重稀土分异程度差别不明显,  $N_{\text{La/Sm}}$ : 1.48~3.89, 平均 3.06。 $N_{\text{Gd/Yb}}$ : 2.27~2.58, 平均 2.45。

### 2.3 岩石稀土元素特征

矿区片麻状黑云母花岗岩属于合水岩体一部分, 稀土元素分析样品采自矿区北部, 样品主要矿物有微斜长石、斜长石、石英, 次要矿物有黑云母、角闪石, 副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿。片麻状黑云母花岗岩稀土总量较高, 为  $218.54 \times 10^{-6}$ , 具有明显的 Eu 亏损,  $\delta_{\text{Eu}}$  为 0.45。球粒陨石标准化配分曲线为一轻稀土富集型曲线。LREE/HREE 为 8.69,  $N_{\text{La/Yb}}$  为 14.03。Ce 具有较弱的负

表 1 稀土含量分析结果表(10<sup>-6</sup>)\*

岩性	斜长角闪岩	黑云斜长片麻岩	片麻状黑云母花岗岩	花岗斑岩	蚀变片麻岩型矿石	蚀变片麻岩型矿石	蚀变片麻岩型矿石	含金石英英脉	含金石英英脉	含金石英英脉
样号	B01	B02	B03	Y302-1	B04	B05	B06	B07	B08	B09
La	8.30	57.00	49.00	29.31	54.51	59.8	32.16	12.00	8.00	2.40
Ce	15.00	55.00	80.00	74.13	94.26	102.56	65.85	20.00	14.00	4.80
Pr	2.00	12.50	7.60	9.77	12.83	15.15	12.01	2.70	1.90	0.65
Nd	9.20	35.00	33.00	31.94	41.65	46.02	40.45	9.80	7.60	2.50
Sm	2.80	7.70	6.60	11.60	8.53	9.57	13.19	2.30	1.60	0.60
Eu	0.58	1.40	0.90	0.02	2.25	2.16	3.28	0.58	0.32	0.10
Gd	2.45	5.50	5.60	13.02	8.77	7.64	15.19	1.75	1.05	0.58
Tb	0.44	0.95	1.00	3.92	1.37	1.23	2.58	0.32	0.19	0.10
Dy	2.90	4.60	6.80	22.68	7.23	6.80	15.16	2.20	0.72	0.26
Ho	0.47	0.88	0.96	4.38	1.43	1.24	2.83	0.39	1.30	0.06
Er	1.25	2.30	2.50	14.55	3.41	2.64	6.22	1.03	0.33	0.16
Tm	0.19	0.26	0.87	3.16	0.48	0.39	0.90	0.16	0.05	0.03
Yb	1.10	1.40	2.30	23.96	2.81	2.37	5.36	1.00	0.26	0.13
Lu	0.17	0.21	0.35	3.81	0.43	0.37	0.83	0.15	0.40	0.02
Y	9.50	19.00	21.00	123.80	36.52	22.35	64.77	10.00	2.05	1.05
ΣREE	56.30	203.7	218.54	370.93	276.48	280.29	280.78	64.38	39.77	13.44
LREE	37.83	168.6	177.16	156.77	214.03	235.26	166.94	47.38	33.42	11.05
HREE	8.97	6.10	20.38	89.48	25.93	22.68	49.07	7.00	4.30	1.34
L/H	4.22	10.47	8.69	1.75	8.25	10.37	3.40	6.77	7.77	8.25
δ <sub>Eu</sub>	0.67	0.63	0.45	0.005	0.87	0.82	0.78	0.86	0.71	0.52
δ <sub>Ce</sub>	0.84	0.47	0.89	1.02	0.81	0.78	0.78	0.80	0.83	0.89
N <sub>La/Yb</sub>	4.98	26.83	14.03	0.81	12.77	16.62	3.95	7.89	20.75	12.12
N <sub>La/Sm</sub>	1.80	4.50	4.52	1.54	3.89	3.80	1.48	3.17	3.02	2.42
N <sub>Gd/Yb</sub>	1.78	1.95	3.15	0.44	2.50	2.58	2.27	1.40	3.26	2.58

\* 除 Y302-1 样品 (据俞受璠, 1990) 以外, 为本次工作资料 (分析单位: 桂林矿产地质研究院, 测试方法: X 射线荧光光谱分析)。

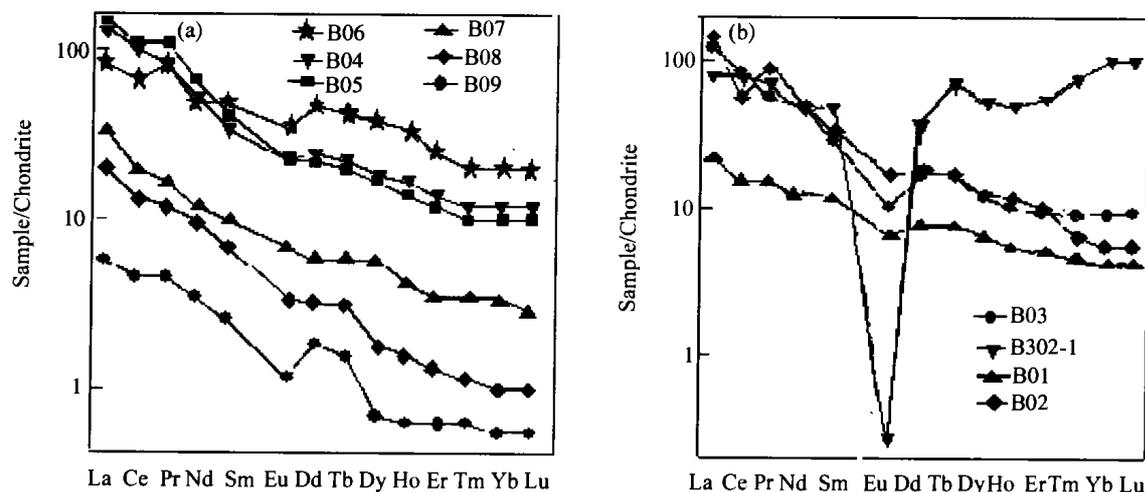


图 3 东田金矿床稀土配分模式

(a) 矿石; (b) 岩石

(B01 ~ B09, B302-1 为样品号)

异常, δ<sub>Ce</sub>为 0.89。N<sub>La/Sm</sub>为 4.52, N<sub>Gd/Yb</sub>为 3.15。  
黑云斜长片麻岩 ΣREE 为 203.7, 具有明显的

Eu 和 Ce 亏损, δ<sub>Eu</sub>, δ<sub>Ce</sub>分别为 0.63, 0.47。球粒  
陨石标准化配分曲线为一轻稀土富集型曲线,

LREE/HREE 为 10.47。轻稀土分异程度较重稀土大,但差别不显著,  $N_{La/Sm}$  为 4.50,  $N_{Gd/Yb}$  为 1.95。

矿区斜长角闪岩的稀土总量为 56.30,有中等的 Eu 亏损,  $\delta_{Eu}$  为 0.67。球粒陨石标准化配分曲线为一弱向右倾的曲线, LREE/HREE 为 4.22,  $N_{La/Yb}$  为 4.98。轻、重稀土分异程度较低,  $N_{La/Sm}$  和  $N_{Gd/Yb}$  分别为 1.80 和 1.78。

燕山晚期花岗斑岩样品采自矿区北西方向数公里的银岩岩体。从表 1 可见,其稀土总量很高,  $\Sigma REE$  为 370.93,具有十分显著的 Eu 负异常,  $\delta_{Eu}$  为 0.005,球粒陨石标准化配分曲线呈“V”型。Ce 没有亏损( $\delta_{Ce}$  为 1.02)。

### 3 讨论

蚀变片麻岩型矿石稀土总量较含金石英脉高,而且,比矿化蚀变前原岩——黑云斜长片麻岩的稀土总量还要高,这与其它一些金矿床的稀土元素特征相一致<sup>[2, 3]</sup>。稀土元素在蚀变片麻岩型矿石富集,可能是与蚀变片麻岩型矿石中含有一定数量的方解石有关。李兆麟等<sup>[4]</sup>对凡口矿床方解石稀土元素的研究结果表明,成矿过程中形成的方解石具有很高的稀土总量和较高的 Eu 正异常。可推测东田金矿床在成矿晚期形成的方解石富含稀土元素,并且由于  $Eu^{2+}$  可置换其中的  $Ca^{2+}$  使方解石富 Eu,这可能是蚀变片麻岩型矿石稀土总量和  $\delta_{Eu}$  都较高的原因。此外,蚀变片麻岩型矿石的稀土元素应有部分来源于黑云斜长片麻岩。黑云斜长片麻岩中明显的 Ce 亏损可能是蚀变片麻岩型矿石的  $\delta_{Ce}$  低于含金石英脉的原因。并且,由于稀土元素不能以类质同象形式进入石英晶格中,主要是存在于石英的流体包裹体中<sup>[2, 5]</sup>,这也许是含金石英脉稀土总量偏低的主要因素。但是,总体看来,含金石英脉和蚀变片麻岩型矿石的稀土元素特征类似,球粒陨石标准化配分曲线基本平行, LREE/HREE,  $N_{La/Yb}$ ,  $N_{La/Sm}$ ,  $N_{Gd/Yb}$  相近似,反映它们具有相同的物质来源。

从稀土元素特征来看,无论是蚀变片麻岩型矿石,还是含金石英脉,其球粒陨石标准化配分曲线及  $\delta_{Eu}$ , LREE/HREE,  $\delta_{Ce}$  等参数,都与燕山晚期花岗斑岩有显著的差别。因此,成矿物质来源于燕山晚期岩浆岩的可能性是很少的。黑云斜长片

麻岩的稀土元素特征也与含金石英脉相似。但是,黑云斜长片麻岩明显的 Ce 亏损( $\delta_{Ce}$  为 0.47),较高的 LREE/HREE (10.47)和  $N_{La/Yb}$  (26.83),说明成矿物质直接来源于黑云斜长片麻岩的可能性不大。然而,蚀变片麻岩型矿石和含金石英脉的稀土元素特征与片麻状黑云母花岗岩非常类似,配分模式和 LREE/HREE,  $\delta_{Ce}$ ,  $N_{La/Yb}$ ,  $N_{La/Sm}$ ,  $N_{Gd/Yb}$  等参数都十分接近,如片麻状黑云母花岗岩  $\delta_{Ce}$  为 0.89,含金石英脉  $\delta_{Ce}$  在 0.80 ~ 0.89 之间,平均 0.84。仅有片麻状黑云母花岗岩的  $\delta_{Eu}$  偏低,  $\delta_{Eu}$  为 0.45,含金石英脉  $\delta_{Eu}$  为 0.70,这可能是岩浆演化为成矿热液过程形成的。可见,区内广泛分布的片麻状黑云母花岗岩最有可能是东田金矿床的成矿母岩。3 个含金石英脉样品的铅同位素测定结果 ( $^{207}Pb/^{204}Pb$  分别为 15.671, 15.644, 15.713;  $^{206}Pb/^{204}Pb$  分别为 18.173, 18.007, 18.411;  $^{208}Pb/^{204}Pb$  分别为 38.734, 38.391, 38.973。由宜昌地质矿产研究所同位素测试研究室测定)在  $^{207}Pb/^{204}Pb$ - $^{206}Pb/^{204}Pb$  图上呈线性关系,用最小二乘法处理得到一条相关系数为 0.9998 的回归直线,该直线与多伊增长曲线的上交点年龄为 500 Ma。赋矿围岩——已蚀变的黑云斜长片麻岩的锆石 U-Pb 下交点年龄也为 500 Ma (由北京铀矿地质研究所分析)。可以推测,成矿年龄为 500 Ma,这也与片麻状黑云母花岗岩成岩年龄基本一致。另外,此类矿床一般分布于片麻状黑云母花岗岩外接触带,与燕山晚期岩浆岩距离较远,也可说明成矿与片麻状黑云母花岗岩之间的密切关系<sup>[6]</sup>。

片麻状黑云母花岗岩和黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩稀土元素的特征总体相似,但 LREE/HREE,  $N_{La/Yb}$  等参数均有一定的差别。这可能反映片麻状黑云母花岗岩是黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩等古老变质岩经重熔作用的产物。即加里东期片麻状黑云母花岗岩的稀土元素是由各种古老变质岩的稀土元素混合而来。

### 4 结论

通过对东田金矿床稀土元素特征研究,可以得出结论,东田金矿床含金石英脉和蚀变片麻岩型矿石的成矿物质具有相同的物质来源。其成矿物质来源于区内广泛分布的片麻状黑云母花岗岩,

成矿时代为加里东期。

### 参考文献:

- [1] 邓 璟, 冯国荣, 杜金龄, 等. 粤西南金矿成矿规律 [M]. 广州: 中山大学出版社, 1991, 61.
- [2] 凌其聪, 刘丛强. 银山多金属矿床成矿流体稀土元素地球化学 [J]. 地质地球化学, 2001, 29(4): 14.
- [3] 于学元, 郑作平, 牛贺才, 等. 八卦庙超大型金矿床稀土元

素地球化学研究 [J]. 地球化学, 1996, 25(2): 140.

- [4] 李兆麟, 郭洪中. 粤北超大型铅锌矿床地质地球化学 [M]. 广州: 中山大学出版社, 1997, 40.
- [5] 范建国, 倪 培, 苏文超, 等. 辽宁四道沟热液金矿床中石英的稀土元素的特征及意义 [J]. 岩石学报, 2000, 16(4): 587.
- [6] Yuan Feng, Zhou Taofa, Yue Shucang. Study on mechanism of formation of volcanic rock in north Allay by using rare earths [J]. J. Rare Earths, 2003, 21(3): 387.

## Rare Earth Elements Geochemistry of Dongtian Gold Deposit in Western Guangdong

Cao Jianjin<sup>1, 2, 3\*</sup> (1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China; 2. Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Yunkai plifted area is one of the important metallogenic areas in Guangdong and Guangxi Provinces, in which many gold, silver, tungsten, tin, lead, zinc, molybdenum, and iron deposits have been found. Dongtian gold deposit in the middle of Yunkai uplifted area, western Guangdong Province, is chosen as an example of those deposits. Comparative studies on the chondrite-normalized RE patterns and  $\Sigma$ RE, LRE/HRE,  $\delta_{Eu}$ ,  $\delta_{Ce}$ ,  $N_{La/Yb}$ , and  $N_{La/Sm}$  of auriferous quartz veins, altered gneiss-type gold ores, Caledonian gneissic biotite granite, and Late Yanshanian granite porphyry were made. The results indicate that the source of the metallogenic materials of the auriferous quartz veins and the altered gneiss-type gold ores are the same, and both of them come from the gneissic biotite granite. Metallogenic epoch of the deposit is estimated to be Caledonian period.

**Key words:** geochemistry; gold deposit; rare earths

ous quartz veins, altered gneiss-type gold ores, Caledonian gneissic biotite granite, and Late Yanshanian granite porphyry were made. The results indicate that the source of the metallogenic materials of the auriferous quartz veins and the altered gneiss-type gold ores are the same, and both of them come from the gneissic biotite granite. Metallogenic epoch of the deposit is estimated to be Caledonian period.

\* \* \* \* \*

## 薄壁铸造和退火工艺对 $LPCNi_{3.55}Co_{0.75}Mn_{0.4}Al_{0.3}$ 贮氢合金电化学性能的影响

吴朝玲\*, 陈云贵, 李 锋, 陶明大, 涂铭旌, 唐定骧

(四川大学金属材料系, 四川 成都 610065)

**摘要:** 研究了不同铸锭厚度(1~10 mm)对薄壁铸造的铸态和退火态  $LPCNi_{3.55}Co_{0.75}Mn_{0.4}Al_{0.3}$  一种新型贮氢合金电化学性能的影响。结果发现: 铸态  $LPCNi_{3.55}Co_{0.75}Mn_{0.4}Al_{0.3}$  合金的 0.2 C 放电容量随着合金锭厚度的增加有增大的趋势。10 mm 厚铸态合金的活化性能优于其它厚度的合金, 且在 1 C 的放电容量和循环稳定性比在其它厚度高。主要原因应归结为该厚度合金具有更大的晶胞体积和更小的晶格应力。退火态 3 mm  $LPCNi_{3.55}Co_{0.75}Mn_{0.4}Al_{0.3}$  合金的综合电化学性能比铸态更优异, 6 mm 合金的循环稳定性和 3~6 mm 合金的活化性能得到改善。主要原因应归结为晶格应力的极大释放以及 Mn 等元素偏析的改善。

**关键词:** 薄壁铸造; 退火; 电化学性能;  $AB_5$  型贮氢合金; 稀土

(全文见: Journal of Rare Earths, 2004, 22(2): 254)