- 10 Kutzbuch J E, Prell W L, Ruddiman W F. Sensitivity of eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau. *J Geol*, 1993, 101: 177~ 190
- 11 Ji Jun Li, Xiao Min Fang, Rob Van der Voo, et al. Magnetostratigraphy dating of river terraces: rapid and intermittent incision by the Yellow River of the northeastern margin of the Tibetan Plateau during the Quaternary. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (B5): 10121~ 10132
- 12 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 甘肃临夏盆地新生代地层年代测定与划分. *科学通报*, 1997, 42(14): 1457~ 1471
- 13 谢又予. 中国石英砂表面结构特征图谱. 北京: 海洋出版社, 1984. 3~ 17
- 14 Krinsley D, Donahue J. *Atlas of Quartz Sand Surface Texture*. New York: Cambridge University Press, 1973. 91
- 15 马玉贞, 李吉均, 方小敏. 临夏地区 30.6~ 5.0 Ma 红层孢粉植物群与气候演化记录. *科学通报*, 1998, 43(3): 301~ 304
- 16 方小敏, 奚晓霞, 李吉均, 等. 中国西部晚中新世气候变干事件的发现及意义. *科学通报*, 1997, 42(23): 2521~ 2524
- 17 张云翔, 陈丹玲, 薛祥煦, 等. 中国北部 5.3 Ma 动物群的年龄分布特征与气候恶化事件. *科学通报*, 1997, 42(7): 734~ 736
- 18 张彭熹. 青藏高原盐湖几个有关地质问题的讨论. 见: 青海柴达木盆地晚新生代地质与环境演化. 北京: 科学出版社, 1986. 50~ 58
- 19 Hsu K J, Montadert L, Bernouilli D. History of the mediterranean salinity crisis. *Nature*, 1977, 267: 399~ 403
- 20 Quade J, Cater J M L, Ojha T P, et al. Late Miocene environmental change in Nepal and the north Indian subcontinent: stable isotopic evidence from paleosol. *Geol Soc Am Bull*, 1995, 107: 1381~ 1391
- 21 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究. *科学通报*, 1998, 43(15): 1569~ 1574
- 22 Bagnold A. Experiment on gravity-free dispersion of large solid sphere in a Newtonian fluid under shear. *Proc Roy Soc of London*, 1954, 225A: 49~ 63
- 23 李吉均, 方小敏, 马海州, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(4): 316~ 322
- 24 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985

(1998-06-23 收稿, 1999-02-02 收修改稿)

煌斑岩岩浆能携带金吗? ——高温超高压实验的证据

黄智龙 朱成明 肖化云 刘丛强

(中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放实验室, 贵阳 550002)

摘要 以云南老王寨金矿区煌斑岩为初始物, 利用 DS-29A 型 3 600 t 超高压装置在 1.5 和 3.0 GPa 条件进行了煌斑岩+ 金体系的熔融实验. 实验结果表明, 均匀分布于煌斑岩中的金粉 (小于 400 目) 聚集成金球沉积于实验产物的底部, 煌斑岩熔体 (玻璃) 中金含量甚微, 煌斑岩中存在硫有利于金聚集成球而沉积. 据此认为煌斑岩岩浆携金能力较差, 在金矿化过程中提供大量金源的可能性较小.

关键词 煌斑岩 金 高温超高压实验

煌斑岩与金矿化时间上、空间上密切共生, 世界范围内许多大型-超大型金矿均有例证. 但直到 Rock 等人^[1, 2] 提出煌斑岩中温热液金矿成因模式 (简称“Rock 模式”) 后, 人们才重新认识到煌斑岩在金矿成矿过程中的重要作用, 寻找煌斑岩与金矿化的成因联系便成为地学界的

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-12-1331>

热门话题。“Rock 模式”最主要的论点是煌斑岩在金矿化过程中起“提供金源”和“提供热液”的重要作用。虽然近年来有许多实际资料和理论研究成果对“Rock 模式”的“提供金源”提出了质疑^[3~6],但还缺乏强有力的实验证据。本文对煌斑岩加金体系进行了高温超高压实验,结果表明煌斑岩岩浆携带大量金源的可能性较小。

1 实验初始物

实验初始物为煌斑岩(97.5%)+金(2.5%)的混合物。煌斑岩采自云南老王寨金矿区,样号为 YD-20,黄智龙等人^[7]已报道过该样品的矿物学、岩石学和地球化学资料。由于原岩中橄榄石全部被蛇纹石、碳酸盐等蚀变矿物替代,辉石也大部分被绿泥石、碳酸盐等蚀变矿物替代,岩石中碳酸盐主要为次生产物,因而实验用煌斑岩做如下处理:()将原岩研磨至 200 目,先用 5:1 的盐酸浸泡 1d,再用 10:1 的盐酸浸泡 2d,浸泡过程中每隔 3~5h 换一次盐酸,浸泡后的样品用蒸馏水清洗 5 次,这样可去除原岩中的绝大部分碳酸盐。清洗后的样品烘干备用;()将河北汉诺坝碱性玄武岩中的二辉橄榄岩包体研磨至 20~40 目,在双目显微镜下挑选出橄榄石和单斜辉石,挑选好的单矿物用 10:1 的盐酸浸泡 1d,再用蒸馏水洗清 5 次。清洗后的单矿物烘干备用;()根据样品 YD-20 的矿物组合^[7],在清洗后的样品中加入 5%(质量百分比,下同)的橄榄石和 10% 的单斜辉石;由于煌斑岩中通常含有少量原生碳酸盐,因而再加入 1% 的方解石;()将混合样品研磨成 200 目的粉末样品。

从表 1 中可见,本次实验用的煌斑岩大部分氧化物与钙碱性煌斑岩和云煌岩的平均化学成分^[8,9]相近,说明经过上述过程处理后的样品可代表未蚀变的煌斑岩。实验用金为小于 400 目的金粉。

表 1 煌斑岩熔融实验初始物的化学成分^{a)}

序号	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	45.06	40.03	51.07	3.00	52.37	51.5±4.0(706)	51.5
TiO ₂	0.69	0.01	0.37	0.03	0.68	1.3±0.6(713)	1.3
Al ₂ O ₃	13.07	0.96	6.45	0.48	12.29	14.0±2.3(679)	12.8
Fe ₂ O ₃	1.96	3.54	1.42	0.04	2.50	3.7±2.3(723)	7.3 ^{b)}
FeO	3.91	5.06	1.54	0.01	2.40	4.9±1.8(640)	
MnO	0.10	0.13	0.08	0.01	0.09	0.15±0.14(630)	0.12
MgO	10.90	39.20	16.60	0.40	12.50	6.9±2.6(751)	7.1
CaO	9.20	1.00	17.70	52.60	7.10	6.6±2.2(728)	6.7
Na ₂ O	1.60	0.06	1.16	0.04	1.69	2.7±1.0(727)	2.0
K ₂ O	3.69	0.07	0.07	0.00	3.21	3.8±2.0(731)	5.6
P ₂ O ₅	0.78	0.03	0.04	0.05	0.58	0.71±0.52(622)	0.95
H ₂ O ⁺	2.67	1.05	0.41	0.31	1.32	2.7±2.0(640)	2.1
H ₂ O ⁻	0.59	0.10	0.03	0.02	0.06		
CO ₂	5.10	8.10	2.20	43.03	3.01	2.2±2.4(311)	2.0
S	0.62				0.08		0.07
总量	99.93	99.34	99.14	100.00	99.88		

a) 全岩成分由中国科学院地球化学研究所李荪蓉高级工程师分析。1——原始煌斑岩,采自云南老王寨金矿区;2——橄榄石,采自河北汉诺坝碱性玄武岩中的二辉橄榄岩包体;3——单斜辉石,采自河北汉诺坝碱性玄武岩中的二辉橄榄岩包体;4——方解石,采自贵州贞丰何家湾冰洲石矿;5——实验用煌斑岩,配制方法见正文;6——钙碱性煌斑岩的成分范围^[8],括号内为统计样品数;7——云煌岩的平均成分^[9]

b) 为全铁

2 实验设备及过程

实验在 DS-29A 型 3600t/6 压机上进行, 该装置配有较完善的高温、高压测试设置和技术, 可进行 2000 °C 和 7. 0GPa 范围内的高温超高压实验. 实验的压力、温度按傅慧芳等人^[10, 11]所用的压力标定和温度测量方法得到.

样品组装方式如图 1, 以边长为 32. 5mm 的立方叶蜡石块(焙烧温度为 450 °C) 为传压介质, 用石墨作电加热体, 样品管也是由石墨制成, 样品的直径和高均为 6mm, 实验前样品先预压成形再装入样品腔, 每次实验用样重量约 0. 5g.

实验过程: 先加载至预定的压力后再通电加热. 加热过程中先将样品置于较低温度预热一定时间(约 10min), 然后按一定速率升温至设计温度[样品全熔温度. 条件实验结果表明: 1. 5GPa 时样品的全熔温度为(1 400 ± 20) °C(升温速率为 20 °C/min, 下同); 3. 0GPa 时为(1 500 ± 20) °C], 恒温 30 min 后淬火, 取出样品观察和分析.

3 结果与讨论

本文进行了 1. 5 和 3. 0GPa 条件煌斑岩+ 金体系的熔融实验, 相同条件下的实验结果表现出较好的重复性. 两种压力条件下的实验产物中均可见:

() 原来均一分布于煌斑岩粉末中的金粉(小于 400 目) 已聚集成金球沉积于底部(图 2(a) 和 (b)), 顶部极少见金球(图 2(c)); 金球直径从 0. 02~ 0. 8mm 不等, 从底面中心向边缘金球的数量减少; () 大部分金球被黄铁矿(电子探针分析为黄铁矿到磁黄铁矿之间的产物, 即 FeS_{1-2}) 球所包裹形成同心球(图 2(d)), 金球、黄铁矿球和玻璃(煌斑岩熔体) 之间的界线明显; () 煌斑岩熔体(玻璃) 中金含量甚微.

煌斑岩的金含量是研究煌斑岩与金矿化关系的重要基础资料, “煌斑岩高含金量”是 Rock 模式的重要理论基础, 国、内外学者^[3~ 6]也正是根据“煌斑岩含金量并不高”对 Rock 模式提出质疑. Rock 模式认为: 煌斑岩来源于富金交代地幔, 岩浆本身富含 CO_2 , H_2O , Rb 和 Ba 等组分, 含 S 适中, 适合于从富金的深部将金携带到地壳浅部, 因而高金含量可能是任何一种煌斑岩的固有属性.

地幔交代作用是一种相当普遍的现象, 煌斑岩来源于交代地幔也被众多微量元素、稀土元素及同位素地球化学研究所证实^[9], 但地幔交代作用过程中能否使金富集还难下定论. 从本次实验结果可见, 即使是煌斑岩来源于富金交代地幔, 地幔部分熔融形成的初始岩浆富含金, 但聚集于岩浆房中的富金煌斑岩岩浆中的金也将汇集成金球, 由于重力作用沉积于岩浆房底部, 而上升侵位的煌斑岩岩浆中的金含量较少.

图 2(d) 中金球被黄铁矿球包裹形成同心球, 这可能与实验用煌斑岩样品中含有少量硫有

图 1 高温、高压实验样品组装图(2: 1)

1——导电钢圈($\varnothing 12 \times \varnothing 8 \times 6$), 2——充填叶蜡石,
3——石墨片($\varnothing 12 \times 1$), 4—— Al_2O_3 管($\varnothing 12 \times \varnothing 10 \times 6$),
5——石墨柱($\varnothing 10 \times 6$), 6——石墨炉($\varnothing 10 \times \varnothing 8 \times 6$),
7——样品腔($\varnothing 6 \times 6$), 8——叶蜡石块(32. 5mm ×
32. 5mm × 32. 5mm)

图2 煌斑岩加金体系高温超高压熔融实验结果

(a) 实验产物底部聚集金球, 13×2 , 1.5 GPa, 1450 °C; (b) 实验产物底部聚集金球, 13×2 , 3.0 GPa, 1500 °C; (c) 实验产物顶部没有金球, 13×2 , 1.5 GPa, 1450 °C; (d) 实验产物底部被黄铁矿包裹的金球, $10 \times 20 \times 2$, 1.5 GPa, 1450 °C

关,因为在熔体中硫与铁结合形成黄铁矿,而黄铁矿与金之间密切共生关系,因而一起聚集下沉. 至于为什么形成同心球还有待进一步研究. 从这可见,岩浆中含有少量硫更利于金的聚集成球而沉积,同样说明上升侵位的煌斑岩岩浆中可能不会含大量的金.

致谢 本工作作为国家“攀登”计划(95-预-39)和国家自然科学基金(批准号:49602026)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Rock N M S, Groves D I. Do lamprophyres carry gold as well as diamonds? *Nature*, 1988, 332: 253~ 255.
- 2 Rock N M S, Groves D I. Can lamprophyres resolve the genetic controversy over mesothermal gold deposits? *Geology*, 1988, 16: 538~ 541
- 3 Wyman D, Kerrich R. Archean shoshonitic lamprophyres associated with Superior Province gold mineralization: distribution, tectonic setting, noble metal abundance and significance for gold mineralization. *Econ Geol Monograph*, 1989, 6: 651~ 667
- 4 Jaques L. Do lamprophyres have high precious-metal contents? *BMR Res Newsl*, 1990, 12: 17~ 18
- 5 Sun S S, Wallace D A, Hoatson D M, et al. Use of geochemistry as a guide to platinum group element potential of mafic-ultramafic rocks: examples from the West Pilbara and Halls Creek Mobile Zone, Western Australia. *Precamb Res*, 1991, 50: 1~ 35
- 6 李献华, 孙贤铸. “煌斑岩”与金矿实际观察与理论的评述. *地质论评*, 1995, 42(3): 252~ 260
- 7 黄智龙, 王联魁. 云南老王寨金矿区煌斑岩岩石学研究. *地质科学*, 1997, 32(1): 74~ 87
- 8 Rock N M S. The nature and origin of lamprophyres: an overview. *Geol Soc Spec Publ*, 1987, 30: 191~ 226
- 9 Rock N M S. *LAMPROPHYRES*. Glasgow: Blackie, 1990
- 10 傅慧芳, 朱成明. 静态超高压容器中温度、压力参数的测试. *物理*, 1980, 9(3): 193~ 195
- 11 傅慧芳, 朱成明. 超高压测量技术和深部岩石矿物的实验研究. *地质地球化学*, 1986, (11): 45~ 48

(1998-07-09 收稿, 1998-11-24 收修改稿)