

原位锶同位素特征与流体-岩石相互作用对成矿分布的控制

王湘涵

河北省地球物理勘查院(河北省浅层地热能研究中心) 河北 廊坊 065000

摘 要:传统全岩锶同位素分析仅能反映矿物平均组成,无法精细刻画单矿物微区流体演化信息。本文选取沉积-热液叠加型锶矿为研究对象,对天青石、方解石开展原位 LA-MC-ICP-MS 锶同位素及流体包裹体测试,解析不同成矿阶段矿物微区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 演化规律,揭示流体-岩石反应强度与矿体空间展布的耦合关系。结果表明,矿物核边同位素差值可定量表征水岩反应强度,中等强度蚀变的灰岩-断裂复合界面是工业矿体主要富集区。基于同位素梯度分异特征构建了流体蚀变分带模型,为同类型隐伏锶矿勘查提供微观同位素理论支撑。

关键词:原位锶同位素;流体-岩石相互作用;天青石;成矿空间分布;热液沉积矿床

引言:大型锶矿多形成于盆地流体与碳酸盐围岩相互作用体系,矿体分布受流体运移路径与水岩反应强度约束。传统全岩锶同位素分析是对多个矿物颗粒的混合测定,无法区分核部与边部、早世代与晚世代的同位素差异,难以定量判别流体-岩石反应程度,制约了深部矿体预测精度。近年来原位微区锶同位素技术可实现微米级单矿物点位测试,为精细刻画流体演化提供了新手段。本文依托典型锶矿区实测数据,系统划分成矿流体演化阶段,剖析不同蚀变围岩界面的锶同位素交换规律,阐明流体-岩石相互作用对矿体水平、垂向富集格局的控制机制。

1 区域地质与样品测试方案

1.1 矿区地质概况

研究区位于上扬子盆地南部锶矿区,属三叠纪浅海蒸发沉积环境。赋矿地层为下三叠统沔湖相白云质灰岩与膏盐岩互层序列,地层呈宽缓向斜构造,层间滑脱断裂与裂隙系统发育,是含锶卤水运移沉淀的核心通道。矿区矿化分为三期:早期沉积预富集阶段形成膏盐层分散锶;中期热液流体沿断裂上升与碳酸盐围岩发生蚀变反应,形成层状、透镜状天青石主矿体;晚期低温流体叠加改造,发育细脉状锶华、菱锶矿。围岩分三类:富 Rb 硅质泥页岩(高放射成因锶)、正常微晶灰岩(中等 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)、蒸发膏盐岩(低放射成因锶)。全区共圈定 8 条矿化带,矿体集中分布于断裂与膏盐灰岩岩性界面交汇处^[1]。

1.2 原位锶同位素测试方法

采集不同成矿世代天青石、方解石及围岩样品共计 246 件(其中天青石 85 件、方解石 67 件、围岩磷灰石 52

件、斜长石 42 件),沿主干勘探剖面及蚀变分带系统取样,覆盖无蚀变围岩、弱蚀变围岩、强蚀变近矿围岩、原生矿体、晚期脉体五类介质。测试采用飞秒激光剥蚀多接收等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成原位微区分析,飞秒激光较纳秒激光剥蚀更均匀、热效应更小、元素分馏效应更低,适于高精度同位素测定。激光束斑 20 μm ,线扫描剥蚀单矿物环带核部与边部,每 10 个测试点插入国际标样 NBS987 监控精度,分析精度(2σ , $n=25$)优于 ± 0.00005 。同步开展流体包裹体显微测温(均一温度 180~260 $^{\circ}\text{C}$)、阴极发光(CL)岩相观察,识别矿物生长环带与流体交代痕迹。

2 典型矿物原位锶同位素微观特征

2.1 不同世代天青石原位锶同位素分异规律

CL 图像显示天青石存在三期生长世代:核部原生天青石(ClsI,自形半自形粒状)、中间震荡环带天青石(ClsII,震荡环带发育)、晚期脉状天青石(ClsIII,他形细脉状)。原位测试呈现显著梯度变化。ClsI 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 介于 0.70768~0.70775,与同期海水膏盐岩同位素组成匹配,代表初始无混染卤水信号;ClsII 比值升至 0.70789~0.70826,反映流体与白云岩围岩发生锶同位素交换,壳源放射成因锶持续混入;ClsIII 跨度最大(0.70831~0.70947),靠近泥页岩断裂带样品比值最高,证明流体穿过富 Rb 泥质围岩后发生强烈水岩反应^[2]。矿物环带从核到边同位素持续增大,直观记录流体-岩石相互作用由弱至强的演化全过程。

2.2 共生脉石矿物方解石原位锶同位素特征

与天青石共生的方解石可依据产状划分为三类,其

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值呈现系统性差异。原生同生方解石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均值为 0.70772, 与原生天青石比值接近, 表明两者在封闭膏盐沉积环境中同步结晶, 流体来源均一。蚀变交代方解石赋存于矿体与围岩接触界面, 均值为 0.70818, 介于原生流体与围岩之间, 反映了中等强度水岩作用对原始矿物的部分改造。晚期脉方解石受围岩影响最为显著, 靠近泥页岩处比值可达 0.70952, 与泥页岩全岩同位素高度重合, 指示流体长距离运移后与硅质碎屑围岩发生了充分反应。同一薄片内不同产状方解石的同位素差异, 可快速判别局部流体-岩石反应的强弱。

2.3 围岩蚀变矿物原位锶同位素响应特征

新鲜灰岩中磷灰石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 稳定于 0.70770; 弱蚀变磷灰石边缘出现溶解再沉淀环带, 比值升至 0.70795; 强蚀变近矿围岩磷灰石整体均一升高至 0.70820 以上, 无原始组分残留。泥页岩中碎屑来源的斜长石蚀变效应更显著, 新鲜斜长石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.71050, 与富含高放射成因锶的泥页岩全岩组成一致; 与流体接触后, 斜长石边缘发生了溶解再沉淀, 新生矿物相记录的最低比值降至 0.70856, 代表外来低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 流体对碎屑斜长石的局部改造。

3 流体-岩石相互作用的锶同位素交换机制

3.1 水岩反应锶同位素交换的物理化学控制条件

锶同位素交换程度受温度、流体/岩石比值、围岩岩性、蚀变时长协同控制。温度越高, Sr^{2+} 离子活性越强, 晶格置换速率提升, 矿区中高温流体 (180~260°C, 流体包裹体均一温度) 蚀变带同位素分异幅度远大于低温流体 (<140°C); 流体/岩石比值是核心指标, 断裂带流体流量大、比值高, 短时间完成大规模锶交换; 岩性差异决定同位素变化方向——灰岩使流体向低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 偏移, 泥页岩使流体向高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 偏移, 膏盐岩几乎无交换; 蚀变持续时间越长, 矿物溶解再沉淀越彻底。

3.2 锶元素迁移与同位素混染分异过程

含锶卤水沿断裂上升过程分为三个阶段。阶段一: 流体初始上升, 仅与膏盐微弱接触, 保持海水同位素特征 (对应 ClsI), 未达天青石饱和浓度; 阶段二: 流体抵达灰岩岩性界面, 发生中等强度蚀变, 围岩 Sr^{2+} 持续溶入, 流体达过饱和, 沉淀层状主矿体 (对应 ClsII), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 小幅抬升; 阶段三: 流体运移至泥页岩断裂带, 强烈水岩反应带入大量放射成因锶 (对应 ClsIII), 但高 Rb 碎屑岩释放 Ba、Ca 杂质, 破坏天青石稳定结晶环境, 仅形成零星细脉^[3]。完整运移路径形成“低比值原生矿体—中比值蚀变带—高比值弱矿化带”同位素梯度

分异模式。

3.3 原位同位素记录流体多期叠加改造信号

全岩测试将多世代同位素平均化, 掩盖多期流体痕迹。原位测试可单独读取不同生长阶段同位素数值: 矿区多数天青石同时保存低比值原生环带与高比值改造边部, 证明至少存在两期流体活动。叠加改造强度越高, 核边同位素差值越大; 单期流体形成的天青石环带变化平缓。泥页岩断裂交汇处矿物环带分异最明显, 是多期流体与围岩反复反应的产物, 对应矿区最富集区域。

4 流体-岩石相互作用对矿体空间分布的控制规律

4.1 水平方向矿体富集与水岩反应强度耦合关系

矿体在水平方向上的分布严格遵循原位锶同位素梯度变化规律, 中等水岩反应强度区间是工业矿体集中产出的核心区域。沿北东向主断裂带开展的系统原位测试表明, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在空间上呈现“低—中—高”的规律性递变, 与矿化强度呈密切的负相关关系。断裂主干通道附近 (<50 m), 流体/岩石比值过高, 大量深部流体快速通过并与泥页岩围岩发生强烈反应, 导致流体中混入过量 Ba、Ca 等杂质, 破坏天青石稳定结晶的化学条件, 因而仅发育细脉状或浸染状弱矿化, 无连续工业矿体。断裂外围 50~200 m 范围的灰岩岩性界面处, 流体流量和流速适中, 与白云岩围岩发生中等程度的锶同位素交换, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 0.70789~0.70818 之间, 此时流体中锶浓度达到饱和、杂质含量低, 形成连续厚大的层状、透镜状天青石矿体, 是矿区最主要的矿石类型。远离构造带 (>400 m) 的区域, 流体补给不足, 水岩反应微弱, 锶元素无法有效富集, 仅见零星矿化斑点, 无工业价值^[4]。统计表明, 矿区 8 条主要矿化带全部位于 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 中等梯度区间内, 高梯度区和低梯度区均无大规模矿体产出, 这一规律可作为矿区外围找矿的重要判别标志。

4.2 垂向剖面流体-岩石反应分层控矿特征

垂向 0~130 m 剖面依据原位同位素组成与水岩反应强度差异, 可清晰划分为三个性质截然不同的分层, 每层矿化规模与矿石类型显著不同。浅层 0~40 m 为氧化淋滤带, 受大气降水和表生作用影响, 原生天青石发生氧化分解, 锶以离子形式被淋失带走, 残留的锶同位素信号杂乱分散, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化无规律, 该带无原生工业矿体发育, 仅见少量表生锶华。中层 40~95 m 为主成矿带, 为中高温卤水 (180~260°C) 与白云岩围岩稳定反应的产物, 天青石原位 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值区间稳定 (0.70789~0.70818)、梯度平缓, 水岩交换强度适中,

流体锶浓度持续饱和且杂质少,赋存矿区主体层状、透镜状矿体, SrO 品位最高,是钻探工程部署的首选靶区。深部 95 m 以下为膏盐基底断裂带,流体在上升晚期穿过泥页岩夹层,强烈水岩反应导致 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 大幅升高至 0.70831~0.70947,同时流体混入大量 Ba、Mg 等杂质,仅局部裂隙产出薄脉状矿层,矿体连续性差、品位偏低。垂向同位素分层规律清晰约束了钻探工程的空间部署方向,明确指示中层中等蚀变带为深部找矿核心靶区。

4.3 岩性-构造复合界面的水岩反应控矿机理

岩性突变界面与断裂破碎带双重叠加的区域,流体-岩石相互作用最为充分,是矿体集中富集的核心部位,其控矿机理可归纳为“构造导流—界面聚矿—交换富集”三位一体的协同效应。近东西向主干导矿断裂作为深部含锶卤水上升的主要通道,为流体大规模运移提供输导体系;北西向次级裂隙则有效增大了流体与围岩的接触面积,使水岩反应更加充分。当流体运移至膏盐岩与灰岩的岩性分界面时,由于两侧岩石物理化学性质差异显著(渗透率、孔隙度、化学成分突变),形成天然的物理化学屏障,流体压力骤然释放、pH 值急剧变化,促使锶硫酸盐快速达到过饱和而大量沉淀。界面两侧的岩性差异还加剧了锶同位素的双向交换——流体从灰岩中持续萃取 Sr^{2+} ,同时围岩接收流体携带的放射成因锶,形成明显的同位素梯度。相比之下,单一岩性且无断裂穿切的区域,流体接触面积有限、交换通道单一,水岩反应效率低下,难以形成规模矿体^[5]。原位测试数据表明,岩性-构造复合界面处天青石的核边同位素差值 ($\Delta^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 显著高于单一围岩区域 (0.0015~0.0022 vs.

0.0003~0.0006),证明复合界面流体活动期次更多、水岩反应持续时间更长,因而控矿效应最强。

结束语

原位锶同位素微区测试可完整记录单矿物生长与流体交代过程的同位素演化信息,弥补了传统全岩分析的不足。成矿流体与不同围岩发生差异化水岩反应,引发 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 规律性漂移——灰岩使同位素降低、泥页岩使同位素升高、膏盐岩几乎无交换——同位素梯度分异直接控制锶矿体水平带状与垂向三层分带格局,中等强度水岩反应的灰岩-断裂复合界面是工业矿体的主要富集区。后续应构建水岩反应定量判别模型、区分表生与原生同位素信号,充分发挥原位锶同位素示踪优势,为盆地蒸发岩型锶矿隐伏矿体定位提供更可靠的理论依据。

参考文献

- [1] 李堃,刘飞,赵武强,等.湘西-黔东南地区碳酸盐岩容矿铅锌矿床成矿模式[J].地球科学,2021,46(4):1151-1172.
- [2] 陈炳翰,孙艳,吴胜华.中国锶矿成矿规律概要[J].地球学报,2025,46(5):934-944.
- [3] 朵德英,刘秀峰,李波.基于构造地球化学弱信息提取技术的金属矿产探测研究[J].物探与化探,2025,49(5):1053-1060.
- [4] 贾伍慧,刘凯,余成华,等.锶同位素在地质学领域的分析技术与应用研究进展[J].岩矿测试,2025,44(2):149-160.
- [5] 吕心雄,杨涛,朱碧.塔里木盆地柯坪地区玉尔吐斯组同位素地层学研究——基于碳、锶同位素的化学地层对比与时代限定[J].石油实验地质,2025,47(5):1003-1016.