文章编号:1009-3850(2013)04-0080-06

# 中国北方砂岩型铀矿中铀的储集空间类型探讨

陈路路<sup>1</sup>,聂逢君<sup>1</sup>,严兆彬<sup>1</sup>,殷栋法<sup>1</sup>,杨冰彬<sup>1</sup>,李晓东<sup>2</sup>,李剑琦<sup>3</sup>,刘 杰<sup>4</sup> (1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室培育基地,江西 南昌 330013; 2. 核工业 270研究所,江西 南昌 330000; 3. 湖南核工业地质调查院,湖南 长沙 410000; 4. 甘肃 省地矿局第二地质矿产勘察院,甘肃 兰州 730020)

摘要:在中国北方的大多数沉积盆地里均发现有砂岩型铀矿床或铀矿化现象。通过样品薄片电子探针背散射图像 分析 结合前人对各盆地砂岩型铀矿中铀矿物的赋存状态及近年来铀储层的研究成果,认为中国北方砂岩型铀矿中 铀矿物的主要储集空间类型可分为原生孔隙(主要是炭屑)、缩小(残留)粒间孔隙、次生溶蚀孔隙、晶间孔隙及微裂 缝。通过对铀储层孔隙类型的分析讨论,有利于进一步从微观了解砂岩铀储层内部结构的不均一性及铀矿物的 成因。

关 键 词:砂岩型铀矿;铀储层;储集空间中图分类号:P619.14文献标识码:A

自 20 世纪 50 年代开始,美国等国家开始致力 于砂岩型铀矿的研究及勘探。到了 80 年代,由于国 际铀价低迷,铀矿开发遭受重创。我国对砂岩型铀 矿的研究起始于 90 年代,虽然起步较晚,但由于国 际铀矿价格回暖和对国外先进勘查及开采技术的 引进和发展,为中国砂岩型铀矿的研究工作带来了 新的机遇。

中国的砂岩型铀矿大多分布在北方的中、新生 代沉积盆地里,且这些盆地多为煤-铀沉积建造、油 气-铀沉积建造或煤-油-铀沉积建造。近年来,国内 外学者对伊犁盆地、吐哈盆地、鄂尔多斯盆地、二连 盆地、松辽盆地5个砂岩型铀矿基地目的层的沉积 体系和成矿模式做了大量的分析,并从岩石学和铀 赋存的角度提出铀储层的概念。铀储层即是砂岩 型铀矿的储集层,焦养泉等(2007)认为铀储层是砂 岩型铀矿地质学的新概念,储层中的孔隙不仅能提 供铀成矿流体的运移通道,还能为铀成矿提供储存 空间<sup>[1]</sup>。由于国内对铀储层研究较少,且多是从宏 观角度分析其孔隙度及物性特征,或者是仅对铀矿 物赋存共生关系进行研究,没有系统地对铀矿物的 赋存空间类型进行划分和总结。因此,对于铀储层 的储集空间类型的研究具有重要的意义。

### 1 砂岩铀储层的空间类型划分

铀储层是一个新概念。焦养泉等(2006)从沉 积学角度对吐哈盆地和鄂尔多斯盆地的铀储层进 了全面的阐述,认为砂岩型铀矿的成矿作用实质上 是在铀储层的多孔介质中完成的,并定性、定量地 阐述了铀储层孔隙结构的复杂性和规律性<sup>[2]</sup>,认为 铀储层孔隙类型微观上分为4种,分别是原生粒间 孔、残余粒间孔、粒内溶孔和微裂缝。李思田等 (1991)对鄂尔多斯盆地砂岩的孔隙结构及成岩作 用进行了阐述,认为孔隙类型可划分为5种类型,分 别是粒间孔隙、残留粒间孔隙、溶蚀孔隙、胶结物晶

收稿日期: 2013-03-28; 改回日期: 2013-04-10

作者简介: 陈路路(1987-),男,硕士研究生,从事矿产普查与勘探方向研究。E-mail: luluchen1987@ yeah. net 通讯作者: 聂逢君(1962-),男,博士后,教授,目前从事沉积学与铀矿地质学研究。E-mail: niefj@ ecit. cn 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 40972067)

间孔隙和裂缝孔隙,其中溶蚀孔隙又包括溶孔、铸 模孔、颗粒内溶孔和胶结物内溶孔等<sup>[3]</sup>。因为中国 北方盆地大多为含油气-铀沉积建造,研究者常根据 油气储层进行孔隙类型划分,将孔隙类型划分为原 生粒间孔、缩小粒间孔、溶蚀扩大粒间孔、颗粒溶 孔、粘土矿物晶间微孔、胶结物溶孔、微裂缝等。杨 威等、唐海发等(2006)也对油气储层的孔隙结构类 型做了相似的划分<sup>[4,5]</sup>。

本文综合上述分类,并结合前人对各盆地砂岩 型铀矿中铀矿物赋存关系的研究结果,对铀储层的 储集空间类型进行了新的划分。笔者认为铀储层 的储集空间主要包括原生孔隙(主要是炭屑)、缩小 (残留)粒间孔隙、次生溶蚀孔隙、晶间孔隙及微裂 缝,在这里把炭屑看作成可内部充填的颗粒。下面 将分别详述几种孔隙类型特征及与铀矿物赋存的 关系。

# 2 原生孔隙

原生孔隙包括原生粒间孔和原生粒内孔。原 生粒间孔隙通常指在成岩前期由于压实作用和胶 结作用而形成的粒间孔隙,与后期的溶蚀蚀变无 关<sup>[2]</sup>,其镜下铸体薄片多呈三角形或多边形。在成 岩后生阶段,由于复杂的地质作用,岩石的原生粒 间孔隙多已损失殆尽了。原生粒内孔主要是成岩 作用期的颗粒内部存在的孔隙,在这里主要是指植 物炭屑。

人们对于有机质与铀成矿关系的研究由来已 久。李盛富等(2004) 认为有机质还原沉淀铀的过 程是一个复杂的物理化学过程,包括对铀的还原、 吸附等作用<sup>[8]</sup>。一般认为有机质主要与 $SO_4^{2-}$ 反应 生成重要还原剂  $H_2S$ ,参与铀的沉淀过程。而吸附 作用主要表现在有机质深埋过程中产生腐植酸,与  $UO_2^{2+}$ 络合形成铀酰有机络合物。

松辽盆地宝龙山地区含矿砂岩 B03-2 和 B05-1 的背散射电子图像中显示铀矿物产于炭屑条带中 (图1A、1B)。在图1A 中发现有黄铁矿交代炭屑, 且黄铁矿与铀矿物赋存共生于炭屑的内部或边缘。 徐喆(2011)认为黄铁矿还原铀矿物,炭屑的存在为 黄铁矿的形成发挥了作用<sup>[9]</sup>。

## 3 缩小粒间孔隙

缩小粒间孔隙也叫残留粒间孔隙,指原生粒间 孔隙由于自生矿物(如自生高岭石、石英、方解石) 占据了孔隙的一部分空间,使孔隙缩小后剩余的孔 隙空间<sup>[7]</sup>。经填隙物局部改造后,粒间孔隙形状不 规则且大小不一。一般在砂岩储层中,缩小粒间孔 隙是铀矿物最主要的孔隙类型之一,占孔隙总数的 20%~30%,大小约在20~90µm之间变化。

在缩小粒间孔隙中的铀矿物又有多种共生关 系和赋存空间,如绕黄铁矿紧密共生、与碳酸盐类 胶结物共生或被粘土矿物吸附在表面等。在松辽 盆地南部宝龙山地区采取的姚家组含矿砂体 B06-1 样品中,背散射图像显示在灰色细砂岩中发育大量 莓状黄铁矿,其存在于碎屑颗粒的粒间孔隙中,铀 矿物(主要是铀石)围绕莓状黄铁矿紧密共生,呈团 块状聚集,周围被碳酸盐矿物胶结(图1C)。样品 B15-1 背散射电子图像显示灰色细砂岩中铀矿物 (沥青铀矿)呈粒状或微脉状赋存于碎屑颗粒与铁 白云石胶结物中。

# 4 次生溶蚀孔隙

次生溶蚀孔隙指在酸性或碱性条件下导致不 稳定碎屑颗粒内部和粒间孔隙中的某些易溶组分 被部分溶蚀后所形成的孔隙空间。这类孔隙的大 小变化很大,个别长石或岩屑颗粒大部或完全被溶 蚀掉成为特大孔隙,可达 200µm。次生孔隙的成因 是成岩后生阶段在 CO<sub>2</sub> 及水(包括大气渗水和反应 水)或有机酸作用下因岩石组分发生溶解而形成 的,中期多为溶蚀孔隙,后期多为裂缝<sup>[11,12]</sup>。

在致密低渗透砂岩储层中溶蚀作用比较重要。 刘志武等(2008)认为若伴有次生孔隙、储集物性其 渗透率可得到极大改观。溶蚀作用不仅能在储层 中产生空隙,还能沟通相邻的孔隙,它是含铀流体 主要的运移通道和存储空间<sup>[4]</sup>。

根据次生溶蚀孔隙的成因及对北方各盆地目 的层的铀矿物赋存共生关系的研究,认为次生溶蚀 孔隙又可分为粒间溶孔、颗粒(长石、岩屑等)内溶 孔、胶结物内溶孔等。

一般认为次生溶蚀粒间孔隙是在缩小粒间孔 隙和原生粒间孔隙的基础上溶蚀扩大空间,并沟通 附近孔隙。宝龙山地区灰色含矿细砂岩 B05-1 和 B03-3 样品的背散射电子图像显示,铀矿物和黄铁 矿在孔隙中整体上呈巨脉状赋存共生,溶蚀作用扩 大并连通了附近孔隙中的铀矿物组合,具后期热液 成因的特点(图1E、F)。

粒内溶孔在含矿砂岩中比较常见。不稳定组 分如长石岩屑及部分石英在 pH > 9.8 时,会出现 SiO<sub>2</sub> 的溶解<sup>[12]</sup>。在二连盆地 2081 铀矿化地区 B399-



#### 图1 含矿砂岩中赋存铀的孔隙类型及特征背散射电子图象

A. 灰色细砂岩中大量铀矿物赋存于植物炭屑碎片中,多呈显微粒状 样品 B03-2; B 灰色细砂岩中炭屑被黄铁矿交代,铀矿物与黄铁矿赋存共 生,多呈粒状,样品 B05-1; C 灰色细砂岩孔隙中铀石围绕莓状黄铁矿生长,产于缩小粒间孔隙中,两者呈团块状聚集,样品 B06-1; D 灰色细砂岩 孔隙中沥青铀矿呈细脉状或粒状大量产于石英或长石颗粒与铁白云石胶结物之间的缩小粒间孔隙中,局部有粒状铀石赋存于胶结物中,样品 B15-1; E 灰色细砂岩孔隙中铀矿物与黄铁矿整体上呈巨脉状共生,见局部连通附近孔隙,样品 B05-1; F 同 E 样品 B03-3; G 菱钙铀矿产于石 英颗粒的溶蚀空洞中 S3-16 井,148.5m; H 灰白色细砂岩中菱钙铀矿产于钾长石颗粒的溶蚀空洞中,S3-16 井,148.5m; I 灰色中砂岩中的显微 粒状铀石产于岩屑内部空洞,样品 B04-9; J 灰色细砂岩孔隙中沥青铀矿呈粒状被胶状黄铁矿包裹,产于铁质胶结物的溶蚀孔隙中,样品 B15-1; K 含矿砂体中早期沥青铀矿以团块状赋存于石英颗粒表面溶孔中,晚期沥青以细脉状、显微粒状分布于碎屑颗粒裂缝中,Y-52; L 铀石与黄铁 矿共生,产于碎屑颗粒裂隙间,边缘见锆石,样品 B04-4

Fig. 1 The backscattered electron images showing uranium occurrence and pore types in the uranium-bearing sandstone samples A. Microgranular uranium in charcoal debris in the grey fine-grained sandstone , Sample B03-2; B. Grained uranium mineral associated with pyrite in the grey fine-grained sandstone , Sample B05-1; C. Coffinite around framboidal pyrite in narrow or residual intergranular pores of grey fine-grained sandstone , Sample B06-1; D. Veinlet or granular pitchblende in narrow or residual intergranular pores of grey fine-grained sandstone , Sample B06-1; E. Veined paragenesis of uranium mineral and pyrite in the grey fine-grained sandstone , Sample B05-1; F. Ditto , Sample B03-3; G. Liebigite in the dissolution pores of quartz grains , 148.5 m , S3-16 well; H. Liebigite in the dissolution pores of K-feldspar grains , 148.5 m , S3-16 well ; I. Microgranular coffinite in the pore spaces of grey medium-grained sandstone , Sample B04-9; J. Granular pitchblende in the dissolution pores of ferruginous cements in grey fine-grained sandstone , Sample B15-1; K. Lumpy pitchblende in the dissolution pores of quartz grains , Sample Y-52; L. Paragenesis of coffinite and pyrite in the fissures of detrital grains , Sample B04-4

样品编号	取样位置	格	UO2	$SiO_2$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	$P_2O_5$	FeO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	$ThO_2$	SO <sub>3</sub>	Total	铀矿物
B03-2	241.13m	灰色细砂岩,含炭屑	84.65	0.83	0.03	1.08	3.26	0.50	1.81	0.01	0.93	0.00		93.08	沥青轴矿
B05-1	310m	灰色细砂岩,含炭屑	52.34	7.24	0.11	5.04	8.95	1.09	0.05	06.0	1.16	0.00		76.94	铀石
B06-1	208m	灰色细砂岩,含炭屑	63.03	8.18	0.13	6.38	8.02	4.65	0.19	0.21	0.42	0.00		91.39	铺石
B15-1	321m	灰色细砂岩	39.73	0.24	0.75	0.05	6.20	10.29	16.71	0.75	0.00	0.45		75.53	含钛铀矿物
B15-1	321m	灰色细砂岩	70.21	2.68	1.49	0.52	0.30	4.59	0.53	0.00	0.72	0.13		81.24	沥青铀矿
B15-1	321m	灰色细砂岩	48.11	11.44	5.88	0.57	0.19	8.29	0.17	0.96	0.29	0.01		76.10	锄石
B03-3	241.23m	灰色中砂岩,含炭屑	32.14	18.55	4.94	3.97	5.93	16.22	0.27	0.79	0.62	0.00		83.45	铀石
B04-9	320.4m	灰色中砂岩	60.27	12.32	0.64	2.36	6.06	0.58	4.95	0.18	0.34	0.00		87.83	铺石
B04-4	329.8m	灰色细砂岩	49.13	12.96	1.54	2.50	6.45	6.35	0.14	0.18	0.03	0.03		79.34	铀石
S3-16	148.5m	灰色细砂岩	35.64	3.13	1.819	15.9	2.01	0.63					2.97	62.1	菱钙铀矿
S3-16 #	148.5m	灰色细砂岩	40.44	7.95	0.212	6.25	0.8	0.57					2.23	58.45	菱钙铀矿
Y-52	不详	灰白色细砂岩	93.29	1.18	0.09	0.00	0.08	0.10	0.00	0.008	0.46	0.04		95.65	沥青铀矿
臣:样品	由东华理工大学	核资源与环境教育部重点实验室分析	所完成。分	析仪器型号	:电子探针	JXA-8100	、能谱仪Im	ica Enery;	加速电压	:15.0 KV	V;电子 <b>列</b>	互班:1 μm			

表1含矿砂岩样品铀矿物电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analyses (%) for the uranium minerals from the uranium-bearing sandstone samples

2013 年(4)

83

探针束流:2.00×10-8A;"-"表示该项未测出或低于仪器检

101 钻井中发现铀钍石与黄铁矿共生在大粒的石英 空洞中,且铀钍石产于黄铁矿边缘位置(图1G)。 图1H 是二连盆地2082 地区铀矿化砂体背散射电 子图像,显示菱钙铀矿产生于钾长石或石英孔隙 中<sup>[13]</sup>。宝龙山地区含矿砂岩 B04-9 样品的背散射 电子图像显示显微粒状的铀石产于岩屑溶蚀孔隙 中(11)。在碱性水介质条件下,石英、长石等颗粒 溶蚀或部分溶解形成小的空洞或颗粒边缘呈锯齿 状,且长石颗粒表面多发生高岭土化或绢云母化等 蚀变,蚀变后体积变小,留出空隙,且能生成的次生 自生矿物具有一定数量晶间孔隙。而后期含铀流 体经过因外界还原因素和孔隙结构的不均一性而 流速减缓,溶蚀孔隙的存在为铀成矿提供了一种空 间上的突变界面,使铀得以在此还原富集成矿。

胶结物溶孔数量一般很少,主要为铁质胶结物 内溶孔(图1J)和少量碳酸盐胶结物内溶孔(图1D)。

## 5 晶间孔隙

指杂基和自生粘土矿物晶粒之间的孔隙,它是 孔隙系统中最小的孔隙,一般在背散射电子图像中 不易发现,但它的数量较多,且对孔隙连通的贡献 较大。一般的晶间孔隙存在于由长石或杂基蚀变 成的自生粘土矿物中,由于晶形差、个体小,排列无 规则,晶间孔隙发育。而由孔隙水沉淀成的自生矿 物,晶形发育好,结晶粗大,所以晶间孔隙不 发育<sup>[3]</sup>。

### 6 微裂缝

微裂缝一般数量极少、孔隙体积有限,但其能 起到连通的作用。随着埋藏深度增加,地层压力、 温度的升高,成岩作用相应加强,岩石的脆性会更 加明显。微裂缝与储集体往往形影相随,如长石受 挤压沿双晶破裂形成连通性好的裂缝孔隙,岩石因 构造挤压而产生相对明显较大的缝隙。

张虎军(2011) 在研究伊犁盆地蒙其古尔铀矿 床含矿砂体的背散射电子像时也发现,沥青铀矿呈 显微粒状分布于岩石裂缝中(图1K)<sup>[15]</sup>。宝龙山 含矿样品 B04-4 的背散射图像显示,铀石与黄铁矿 紧密共生,并沿岩石裂隙呈脉分布(图1L)。邢秀娟 等(2006)在研究鄂尔多斯盆地店头地区铀矿物赋 存关系时发现黑云母解理缝中存在铀矿化现象<sup>[16]</sup>。

7 结论与认识

通过对松辽盆地、二连盆地等沉积盆地中含矿

砂岩的背散射电子图像的孔隙类型特征分析,并结 合前人对砂岩铀储层孔隙结构的研究,笔者得出以 下结论及认识:

(1)中国北方砂岩型铀矿床铀的储集空间类型 主要为原生孔(炭屑)、缩小粒间孔、次生溶蚀孔、晶 间孔隙、微裂缝。

(2)缩小粒间孔和溶蚀孔是铀矿物主要的赋存 空间,有机质含量较高的岩石常发育原生孔。晶间 孔、微裂缝及溶蚀孔隙在连通附近孔隙中贡献较大。

(3) 成岩作用和成岩后期蚀变改变铀储层的孔 隙结构和类型,对铀矿物的赋存空间影响较大,有 利于铀的还原沉淀。

#### 参考文献:

- [1] 焦养泉,吴立群,杨琴.铀储层-砂岩型铀矿地质学的新概念 [J].地质科技情报,2007,26(4):1-7.
- [2] 焦养泉,吴立群,杨生科等.铀储层沉积学-砂岩型铀矿勘查与 开发的基础[M].北京:地质出版社,2006.189-190.
- [3] 李思田 焦养泉 /付清平.鄂尔多斯盆地侏罗纪延安组三角洲 及河流砂体内部构成及不均-性研究[M].北京:石油工业出 版社 ,1991.
- [4] 杨威 魏国齐,金惠,等.川东北飞仙关组鲕滩储层发育的主控因素和成因模式[J].天然气地球科学,2007,18(2):192-196.
- [5] 唐海发 彭仕宓 赵彦超.大牛地气田盒2+3 段致密砂岩储层 微观孔隙结构特征及其分类评价[J].矿物岩石 2006 26(3): 107-113.
- [6] 李宗银. 川西前陆盆地上三盛统油气成藏条件及勘探前景 [D]. 2006.
- [7] 王成 邵红梅. 大庆长垣以西地区中部油层组合次生孔隙研究 [J]. 大庆石油地质与开发 ,1999 ,18(5):5-8.
- [8] 李盛富 涨蕴.砂岩型铀矿床中铀矿物的形成机理[J].铀矿地 质 2004 20(2):80-90.
- [9] 徐喆 吴仁贵,余达淦,等.松辽盆地砂岩型铀矿床的热液作用 特征-以宝龙山地段砂岩铀矿为例[J].东华理工大学学报(自 然科学版) 2011 34(3):201-208.
- [10] 吴仁贵,蔡建芳,于振清,等.松辽盆地白兴吐铀矿床热液蚀 变及物质组成研究[J].铀矿地质 2011 27(2):74-80.
- [11] 张厚福,方朝亮,高先志,等.石油地质学[M].北京:石油工 业出版社,1999.107-111.
- [12] 朱筱敏. 沉积岩石学 [M]. 北京: 石油工业出版社 2008.63 -64.
- [13] 聂逢君,陈安平,彭云彪,等.二连盆地古河道砂岩型铀矿
  [M].北京:地质出版社 2010.145-163.
- [14] 刘志武 韩代成.鄂尔多斯盆地马家滩地区延长组岩石学特 征及其意义[J].东华理工大学学报(自然科学版) 2008 31 (4):313-318.
- [15] 张虎军. 伊犁盆地蒙其古尔铀矿床后生蚀变及铀矿物组成研 究[J]. 能源研究与管理 2011 (4):31-33.
- [16] 邢秀娟 柳益群 樊爱萍. 鄂尔多斯盆地店头地区砂岩型铀矿 成因初步探讨[J]. 中国地质 2006 33(3):591-597.

# An approach to the uranium reservoir space types in the sandstone-type uranium deposits in northern China

CHEN Lu-lu<sup>1</sup> , NIE Feng-jun<sup>1</sup> , YAN Zhao-bin<sup>1</sup> , YIN Dong-fa<sup>1</sup> , YANG Bing-bin<sup>1</sup> , LI Xiao-dong<sup>2</sup> , LI Jian-qi<sup>3</sup> , LIU Jie<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Nuclear Resources and Environments, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. No. 270 Institute, China National Nuclear Corporation, Nanchang 330000, Jiangxi, China; 3. Hunan Institute of Geological Survey, Hunan Bureau of Nuclear Geology, Changsha 410000, Hunan, China; 4. No. 2 Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730020, Gansu, China)

**Abstract**: The sandstone-type uranium deposits or uranium mineralization were discovered in most of sedimentary basins in northern China. The authors propose , in terms of backscattered electron images analysis in this study and previous results of research concerning the uranium occurrence and uranium reservoirs in the sandstone-type uranium deposits in some sedimentary basins in northern China that the main reservoir space types in the sandstone-type uranium deposits in northern China include the primary pores (dominatedly charcoal debris) , narrow or residual intergranular pores , secondary dissolution pores , intercrystal pores and microfissures. The diagenesis and postdiagenetic alteration may change the pore structures and types , and facilitate the reduction and precipitation of uranium.

Key words: sandstone-type uranium deposit; uranium reservoir; reservoir space