

文章编号:1672-6561(2016)05-0569-09

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

湘西北海相磷块岩中纳米级钛铀矿的发现及地质意义

漆富成,李治兴,王文全,杨志强,彭波,王振云,东艳

(核工业北京地质研究院 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室,北京 100029)

摘要:在扬子陆块东南缘湘西北武陵地区下寒武统牛蹄塘组海相黑色岩系下部鲕粒磷块岩中发现超细小纳米级钛铀矿。通过扫描电镜能谱分析测定钛铀矿的化学成分,Ti质量分数为19.24%~20.37%,U为44.37%~46.86%,O为26.05%~31.01%,V和Cr元素以类质同象混入物形式存在于钛铀矿中。高分辨透射电子显微镜能谱曲线也表明其为U和Ti的复杂氧化物,化学式为(U)Ti₂O₆(OH)。钛铀矿产出于同沉积鲕粒磷块岩经强溶蚀重结晶作用形成的磷块岩微裂隙和重结晶磷灰石晶粒间微空隙中,与重结晶磷灰石、重结晶石英、锐钛矿、含铅黄铁矿、叶腊石、金云母、绢云母等共沉淀析出。通过钛铀矿空间占位和载体基质的微区解剖研究认为,湘西北海相磷块岩中钛铀矿的形成与镁铁质—超镁铁质海底喷流系统侵位于海相磷块岩发生热液脱碳作用有关。纳米级钛铀矿的发现对探讨钛铀矿在自然界的存在状态及其成因机理有重要意义。

关键词:钛铀矿;海相磷块岩;扫描电镜;微区;海底喷流;热液脱碳;成因机理;湖南

中图分类号:P618.47;P619.14 文献标志码:A

Discovery and Geological Significance of Nanoscale Brannerite from Marine Phosphorite in the Northwestern Hunan

QI Fu-cheng, LI Zhi-xing, WANG Wen-quan, YANG Zhi-qiang, PENG Bo,
WANG Zhen-yun, DONG Yan

(CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology,
Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: It is firstly discovered that nanoscale brannerite from oolitic phosphorite in the lower part of Lower Cambrian Niutitang Formation marine black rock series in Wulin area of the northwestern Hunan, the southeastern Yangtze Plate. The chemical composition was analyzed by SEM and high-resolution transmission electron microscopy. The results show that the orthobrannerite occurs in the form of basaltiform platy prismatic joint, the mass fractions of Ti, U and O are 19.24%-20.37%, 44.37%-46.86% and 26.05%-31.01%, and the V and Cr occur in brannerite in the form of isomorphic mixture; the calculated chemical equation with electron microprobe analysis is (U)Ti₂O₆(OH); the orthobrannerite occurs in phosphorite microcrack and microvoid, and precipitates out together with recrystallization apatite, recrystallization quartz, anatase, lead pyrite, pyrophyllite, phlogopite and sericite; the phosphorite microcrack is formed by synsedimentary oolitic phosphorite, which is recrystallized and strongly eroded; according to the characteristics of space occupying and microarea of carrier matrix, the formation of

收稿日期:2016-05-19

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(DD2016013620);中核集团地矿事业部铀矿地质科研项目(201493)

作者简介:漆富成(1962-),男,甘肃漳县人,研究员级高级工程师,博士研究生导师,理学博士,E-mail:qfc9818@163.com。

orthobrannerite is in connection with the hydrothermal decarbonization process of mafic-ultramafic submarine exhalation system emplaced in marine phosphate rock of the northwestern Hunan. The discovery of nanoscale brannerite is very important for discussing the natural existing state and genetic mechanism of orthobrannerite.

Key words: brannerite; marine phosphorite; SEM; microarea; submarine exhalation; hydrothermal decarbonization; genetic mechanism; Hunan

0 引言

天然钛铀矿几乎均呈变生态产出,变生矿物指其内部结构遭到破坏但仍保持晶体外形的矿物^[1],按变生矿物产生衍射线的强度判别其非晶化程度。在自然界尚未发现完全结晶质的钛铀矿^[2]。钛铀矿的原始结构数据甚少,目前主要根据钛铀矿X射线粉晶分析数据、人工合成钛铀矿的结构或结晶质变种的结构来推测其原始结构^[2-4],进而推论钛铀矿发生变生作用的成因和机理^[1]。截至目前,几乎只涉及该矿物产出的地质条件或矿物学定性描述,或根据化学成分和形态研究^[1-2],偶有介绍生成物理化学条件的资料,也零星少见^[2]。本次超细小纳米级钛铀矿的发现对研究钛铀矿在自然界的存在形式提供了实体,对研究钛铀矿的成因机理有重要意义。

1 区域地质背景

研究区位于扬子陆块东南缘湘西北武陵地区,含

矿主岩为下寒武统牛蹄塘组海相黑色岩系,下部为鲕粒磷块岩,其上为铀镍钼多金属磷块岩,上部为由碳质页岩、碳质板岩和硅质板岩组成的碳硅泥岩(图1)。本研究在下寒武统牛蹄塘组海相黑色岩系下部鲕粒磷块岩中发现纳米级斜方钛铀矿,通过扫描电镜和高分辨透射电镜研究斜方钛铀矿的化学成分,从斜方钛铀矿的产出状态和晶出方式探讨含铀磷块岩中斜方钛铀矿的形成与海底喷流沉积作用的成因联系。

2 样品制备和试验条件

将野外露头挖掘2 m采集新鲜磷块岩样品;通过切割、磨薄、抛光,制成扫描电镜用的光薄片,进行 α 径迹蚀刻照相,对 α 径迹分布密集位置进行标记;通过喷碳处理后利用扫描电镜进行分析。扫描电镜在北京科技大学新金属材料国家重点实验室进行,使用日本电子公司生产的JSM-6510扫描电镜完成。试验条件为:加速电压25 kV、束流415 nA,成分分析的束斑直径1 μm 。

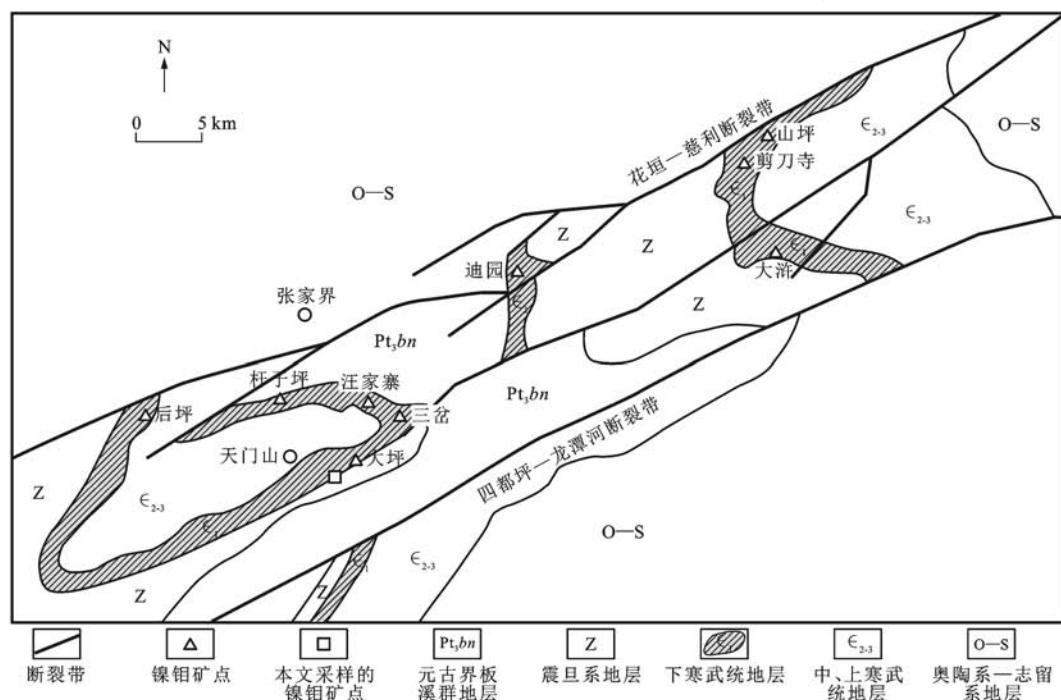


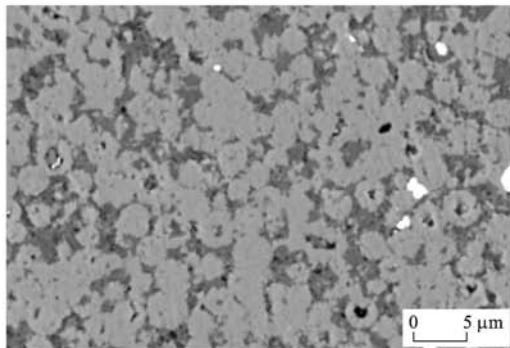
图1 湘西北镍钼矿带区域地质简图

Fig. 1 Regional Geological Sketch Map of Ni-Mo Deposits Distribution in the Northwestern Hunan

用于高分辨透射电镜(HRTEM)研究的磷块岩试样采用超薄切片和离子减薄方法制备。首先制备0.3 mm超薄切片;再将其机械抛磨成120~150 μm厚的薄片,抛光100 μm;然后再将试样贴在铜环上制成直径3 mm的圆片;利用氩离子减薄成超薄试样;使用北京科技大学新金属材料国家重点实验室Philip Tecnai型高分辨透射电子显微镜进行观察,其分辨率为1 nm,工作电压为200 kV;使用X射线能谱分析系统,以获得TEM图像、电子衍射(SAED)和能谱分析成分(EDS)。

3 化学成分

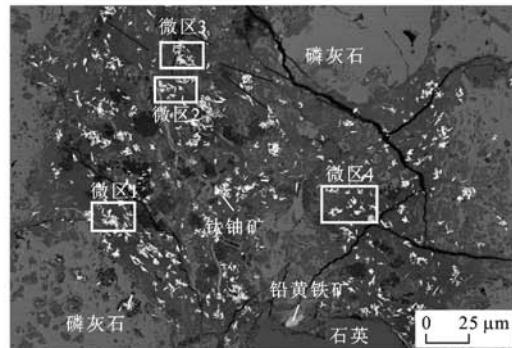
武陵地区下寒武统牛蹄塘组底部含铀磷块岩原岩为海相沉积鲕粒磷块岩,鲕粒由磷质、钙质和硅质



(a) 同沉积鲕粒磷块岩(局部部分溶蚀)

组成,球状鲕粒外围由碳质包围,粒径大小为2~5 μm[图2(a)]。钛铀矿主要沿同沉积鲕粒磷块岩经过强溶蚀重结晶磷块岩的微裂隙中产出;主要由粒径为0.05~1.00 μm(纳米—微米级)超细小的钛铀矿和集合体组成[图2(b)]。新发现的钛铀矿为50~1 000 nm超细小纳米—微米级矿物。由于钛铀矿极超细小,为了研究钛铀矿的空间占位、基质载体及其集合体的形体特征和化学成分,从磷块岩的微裂隙中切出4个微区[图2(b)]显示超细小纳米级钛铀矿及其集合体的形体特征(图3),并对微区1和微区4进行详细研究。

钛铀矿主要沿强溶蚀重结晶磷块岩微裂隙中产出,主要呈柱状、板柱状自形晶分布。钛铀矿除主元素U、Ti、O外,还有V、Si、Al、Mg、Ca等杂质元素。



(b) 强溶蚀重结晶磷块岩微裂隙中的钛铀矿及微区

图2 磷块岩背散射电子图像

Fig. 2 Backscattered Electron Images of Phosphorite

钛铀矿为50~1 000 nm超细小纳米级矿物,呈柱状、板状晶形产出。本次测定得到钛铀矿高分辨透射电镜能谱曲线(图4)。由于钛铀矿超细小,所制样减薄不均衡,未能获得理想的电子衍射图谱和晶胞参数。但该矿物的化学成分、背散射电子图像和高分辨透射电镜能谱曲线都表明其为U和Ti的

复杂氧化物,且5个测点的Ti含量(质量分数,下同)为19.24%~20.37%,U含量为44.37%~46.86%,O含量为26.05%~31.01%,按测点扫描电镜能谱分析化学成分,计算出矿物的化学式(表1)。其简化式为(U)Ti₂O₆(OH),与斜方钛铀矿的化学式一致。

表1 钛铀矿的扫描电镜能谱分析化学成分和计算的矿物化学式

Tab. 1 SEM and EDS Analysis Chemical Composition and Calculated Chemical Equation of Brannerite

样品编号	w(U)/%	w(Ti)/%	w(V)/%	w(O)/%	w(Al)/%	w(Si)/%	w(Ca)/%	w _{total} /%	化学式
DP125-7-4	46.71	20.37	1.32	26.05	0.42	1.92	2.75	99.54	(U _{0.92} Ca _{0.08})Ti ₂ O _{5.92} (OH) _{1.08}
DP125-10-68	44.61	20.15	1.02	28.48	0.87	3.04	1.84	100.01	(U _{0.89} Ca _{0.11})Ti ₂ O _{5.89} (OH) _{1.11}
DP125-10-33	45.28	19.88	0.44	30.07	0.62	1.92	1.79	100.00	(U _{0.89} Ca _{0.11})Ti ₂ O _{5.89} (OH) _{1.11}
DP125-10-61	46.86	19.71	0.69	28.76	0.57	1.76	1.67	100.02	(U _{0.95} Ca _{0.044})Ti ₂ O _{5.95} (OH) _{1.04}
DP125-10-58	44.37	19.24	0.59	31.01	0.84	2.40	1.55	100.00	(U _{0.89} Ca _{0.10})Ti ₂ O _{5.91} (OH) _{1.12}

注:w(·)为元素含量;w_{total}为元素总含量。

4 产出状态和晶出方式

对钛铀矿产出状态和晶出方式的研究甚少。以

往研究表明,天然钛铀矿主要有3种生成方式:直接从成矿溶液中晶出;交代原先含钛矿物;含U、Ti的氧化物和氢氧化物经受后期热液改造重结晶。湘西

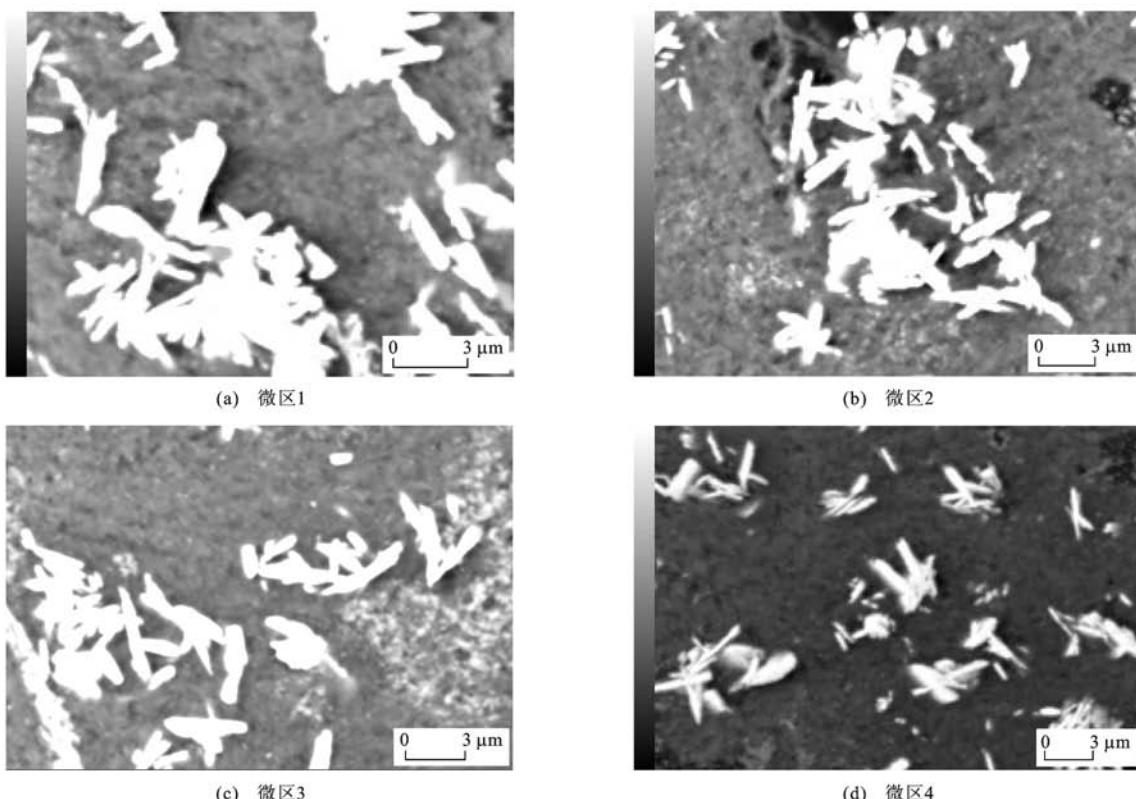


图 3 微区 1~4 钛铀矿背散射电子图像

Fig. 3 Backscattered Electron Images of Brannerite of Microareas 1-4

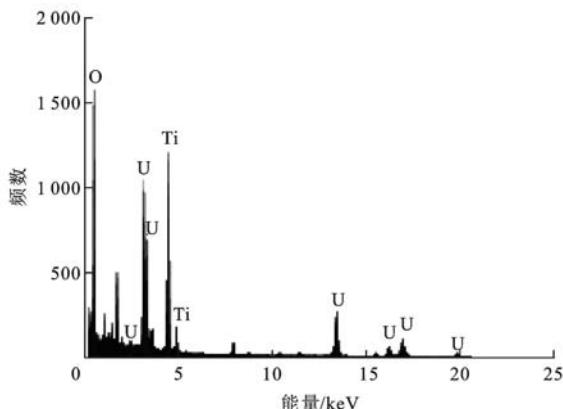


图 4 钛铀矿高分辨透射电镜能谱曲线

Fig. 4 High-resolution Transmission Electron Microscopy Spectrum Curve of Brannerite

北磷块岩中的钛铀矿是在热液流体中多种元素化合物处在过饱和状态的动态环境下,出现的快速共沉淀现象。

4.1 空间占位

钛铀矿产出于同沉积鲕粒磷块岩经强溶蚀重结晶作用形成的磷块岩微裂隙和重结晶磷灰石晶粒间微空隙中。钛铀矿主要呈自形—半自形板柱状晶体(图 5),其基质载体由磷灰石、叶腊石、金云母、绢云母和有机碳等组成。

磷灰石矿物的再结晶作用就是排出杂质的过程,自形程度越好,结晶力越强,排出有机碳和矿质等杂质的能力越强。同时,介质中杂质的种类和含量也影响矿物的自形程度。脱出的有机碳、矿质和热液作用携带的矿物质在磷块岩中的微裂隙聚集。

微区 4 元素面分布图显示钛铀矿中 U、Ti、V 和 Cr 元素分布状态呈现高度均匀分布(图 6)。使用 JSM-6510 扫描电镜自动合成四元素面分布复合图像。结果显示,斜方钛铀矿中 U、Ti、V 和 Cr 元素分布呈现高度吻合状态(图 7)。这是因为 Ti、V 和 Cr 为铁族元素,具有相似的电负性和离子半径。 Ti^{4+} 离子半径为 0.068 nm, V^{3+} 离子半径为 0.074 nm, Cr^{3+} 离子半径为 0.069 nm,由于结晶化学及地球化学性质相似,V 和 Cr 可能以类质同象混入物的形式存在于钛铀矿中。磷灰石矿物重结晶过程中,脱出的有机碳、矿质和热液作用携带的矿物质(U、Ti、Pb、Se、Zn、V、As、Ca、P、Si、Al、Na、Mg、S、O、C 等)在磷块岩中的微裂隙聚集。随着含矿溶液出现过饱和状态,钛铀矿析出。

4.2 载体基质

钛铀矿产出于磷块岩微裂隙和微空隙中充填的

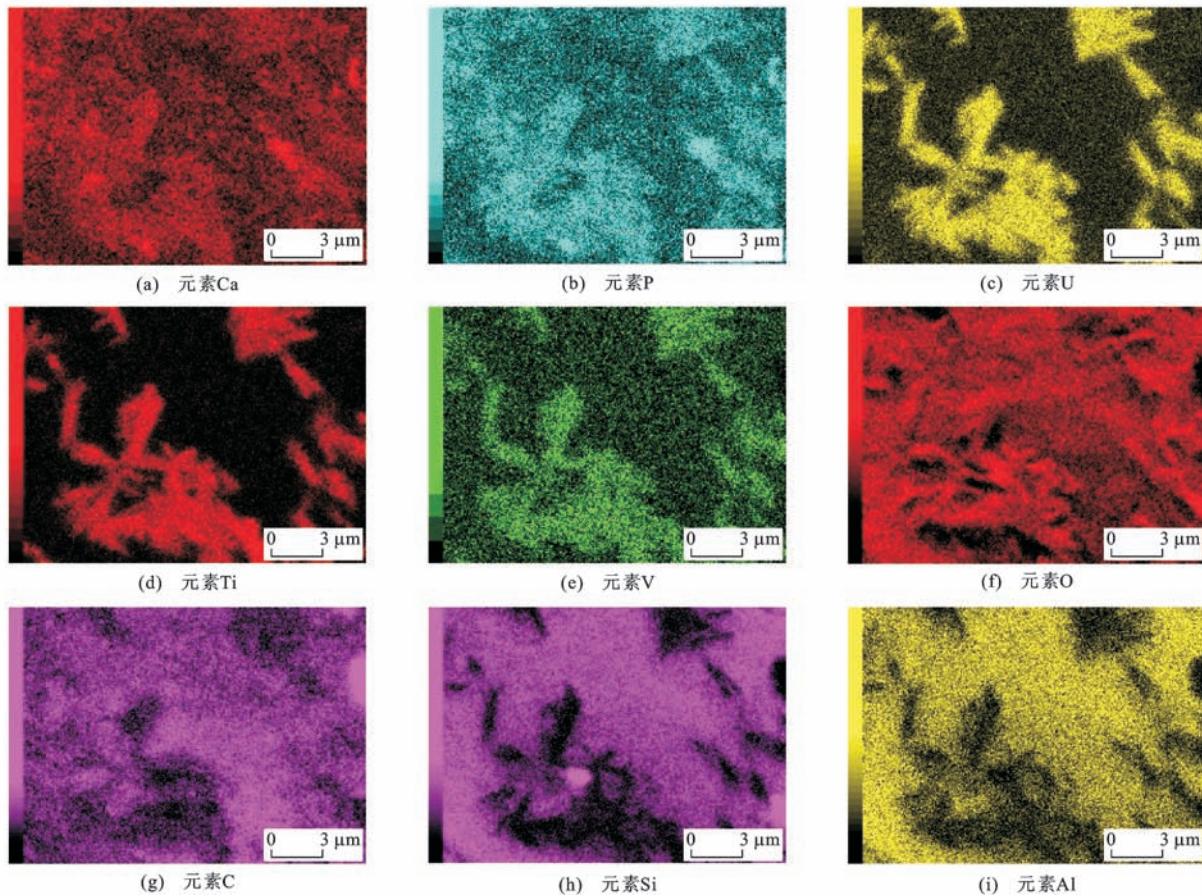


图5 微区1中钛铀矿X射线衍射图像

Fig. 5 X-ray Diffraction Images of Brannerite in Microarea 1

载体基质和有机碳中(图6)。由叶腊石、绢云母、有机碳和磷灰石等组成的基质化学成分见表2。

钛铀矿与以叶腊石、绢云母、铝金云母为主的硅铝化合物共生。对该硅铝化合物进行能谱分析, Si含量平均为20.10%, Al为10.70%, K为4.01%, Mg为2.29%, O为46.45%。按电子探针化学成分分析结果计算出矿物组成为:叶腊石含量为33.12%~51.48%,绢云母为20.97%~21.75%,铝金云母为7.75%~37.68%,另外有不等量的羟磷灰石、石英、维石墨和氧矾石。孤立组分有机碳被排挤在直接晶出钛铀矿的周边,不均匀混杂在硅铝化合物中,局部形成维石墨,共同构成钛铀矿的载体基质。

微区4中元素面分布图显示,由叶腊石、绢云母、铝金云母和有机碳等组成钛铀矿的载体基质,Si、Al和Mg元素分布状态呈现高度均匀分布(图6)。使用JSM-6510扫描电镜自动合成四元素面分布复合图像。结果显示,斜方钛铀矿的载体基质中Si、Mg、Al元素分布呈现高度吻合状态(图8),有机碳以不均匀分散状态混杂分布于其中。

微区1中U、Ti、Si和C四元素面分布见图5。四元素合成复合图像显示,U、Ti元素分布呈现高度吻合状态,构成钛铀矿的清晰晶形轮廓,与由叶腊石、绢云母和有机碳等组成的斜方钛铀矿载体基质构成共生包围关系。有机碳以不均匀分散状态分布于其中(图9)。

4.3 磷块岩的热液脱碳作用与钛铀矿的矿物共生组合

钛铀矿与同沉积鲕粒磷块岩经强溶蚀重结晶作用形成的重结晶磷灰石、重结晶石英、锐钛矿、叶腊石、金云母、绢云母共生。对同沉积鲕粒磷块岩、部分溶蚀磷块岩和重结晶磷块岩进行扫描电镜成分(更小微区)测定(表3~6),同沉积鲕粒磷块岩有机碳平均含量为12.85%,部分溶蚀磷块岩有机碳平均含量为8.40%,而重结晶磷灰石和重结晶石英中几乎不含有机碳。

热液对海相沉积鲕粒状磷块岩进行强溶蚀和溶解作用。从同沉积鲕粒状磷块岩、部分溶蚀磷块岩和重结晶磷块岩脱出的有机碳、矿质和热液作用携带的矿物质在磷块岩中的微裂隙和微空隙中形成纳

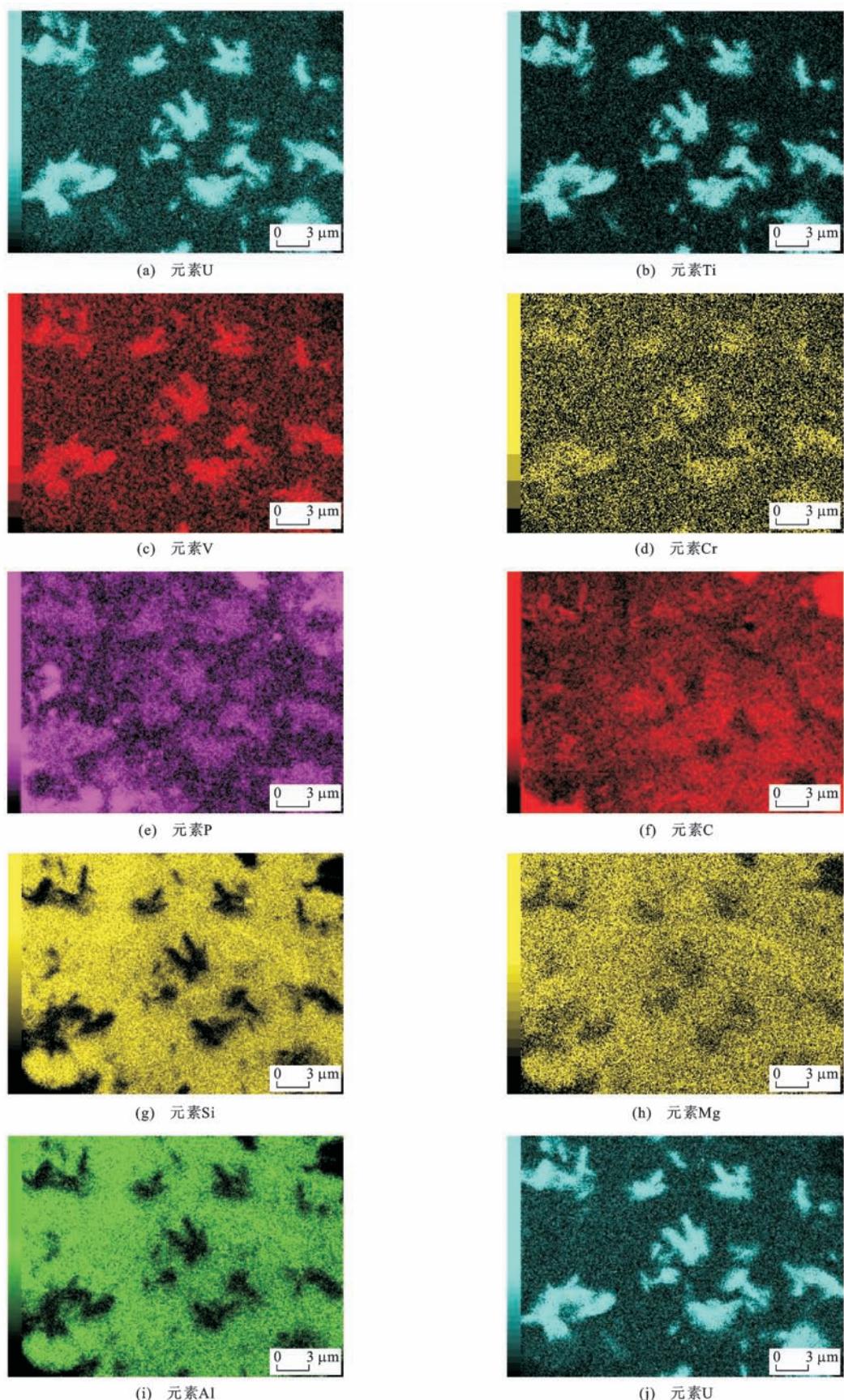
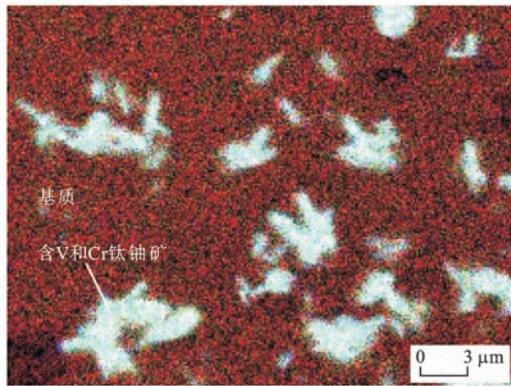


图 6 微区 4 中钛铀矿 X 射线衍射图像

Fig. 6 X-ray Diffraction Images of Brannerite in Microarea 4



含V和Cr钛铀矿分布于叶腊石、绢云母和有机碳等组成的基质中

图7 微区4中U、Ti、V和Cr四元素面分布合成复合图像

Fig. 7 Four-element Distribution Synthesized Composite

Image of U, Ti, V and Cr in Microarea 4

表2 基质扫描电镜能谱分析测点的化学

成分和矿物成分

Tab. 2 Chemical Composition and Mineral Composition of Matrix by SEM and EDS Analysis

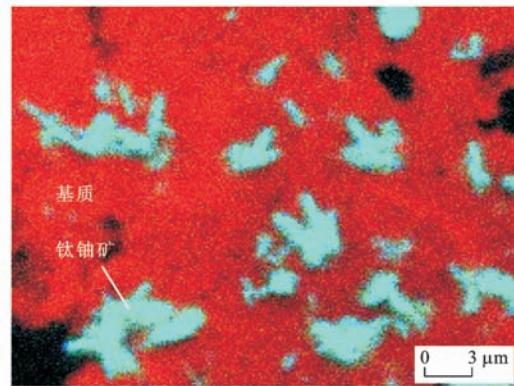
样品编号	DP124-35	DP124-40	DP125-7	DP134-15	DP134-22
w(Si)/%	18.98	18.80	22.17	23.11	17.46
w(Al)/%	9.65	12.54	10.79	10.91	9.60
w(Mg)/%	1.73	1.02	2.98	3.17	2.55
w(K)/%	2.96	2.52	3.75	2.85	2.98
w(C)/%	23.75		13.82	12.00	20.34
w(Ca)/%	1.70	5.91			
w(P)/%	0.9	4.1			
w(F)/%			1.22		
w(O)/%	39.52	55.10	43.31	47.97	46.35
w(V)/%	0.82		1.96		0.72
叶腊石含量/%	33.12	51.48	33.38	45.61	43.04
绢云母含量/%	21.75	20.97	21.25		21.25
铝金云母含量/%	13.76	7.75	23.66	37.68	24.59
榍石墨含量/%	14.74		3.24		2.53
石英含量/%	10.06		14.07	16.71	6.40
羟磷灰石含量/%	4.92	16.36			
氧砾石含量/%	1.35		4.20		1.88
游离P ₂ O ₅ 含量/%	0.30	3.44			

注:C含量减除了11%喷镀薄膜用喷碳量。

米级斜方钛铀矿、锐钛矿、磷灰石、叶腊石、金云母和绢云母共沉淀析出。孤立组分有机碳被排挤在这些直接晶出晶体的周边。

5 成矿机理

早寒武世时期,扬子陆块东缘构成的陆缘裂陷

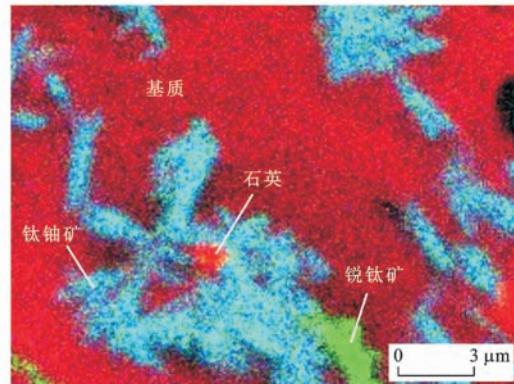


钛铀矿分布于叶腊石、绢云母、金云母和有机碳等组成的基质中

图8 微区4中Si、Al、Mg和U四元素面分布合成复合图像

Fig. 8 Four-element Distribution Synthesized Composite

Image of Si, Al, Mg and U in Microarea 4



钛铀矿分布于叶腊石、绢云母、铝金云母和有机碳等组成的基质中,并与石英、锐钛矿共生

图9 微区1中U、Ti、Si和C四元素面分布合成复合图像

Fig. 9 Four-element Distribution Synthesized Composite

Image of U, Ti, Si and C in Microarea 1

表3 同沉积鲕粒磷块岩的扫描电镜能谱分析化学成分

Tab. 3 SEM and EDS Analysis Chemical Composition of Synsedimentary Oolitic Phosphorite

样品编号	w(Ca)/%	w(P)/%	w(F)/%	w(Si)/%	w(O)/%	w(C)/%
DP125-10-47	26.67	13.55	3.25	3.69	39.18	13.25
DP125-10-14	31.23	15.12	3.71	0.34	37.12	12.49
DP125-10-51	30.67	15.06	3.76	0.56	37.14	12.82

成矿体系中,成矿作用与沉积成岩作用和热水沉积作用有关^[5-7],由于强烈拉张和构造沉降,伴随火山热液喷出和海水对流循环形成海相沉积鲕粒状磷块岩^[6]。同沉积鲕粒状磷块岩形成之后,热液作用持续,经部分溶蚀和强溶蚀,有机碳部分脱出。随着热液作用持续,富含U、Ti、Cr、Co、V、Fe、Pb、Cu、Sb、As、Ba元素的成矿热液对海相沉积鲕粒状磷块岩进行强溶蚀和溶解作用,形成重结晶磷块岩(由再结晶磷灰石和石英组成),排出有机碳、矿质等杂质。脱

表4 部分溶蚀磷块岩的扫描电镜能谱分析化学成分

Tab. 4 SEM and EDS Analysis Chemical Composition of Partial Dissolution of Phosphate Rock

样品编号	w(Ca)/%	w(P)/%	w(F)/%	w(Si)%	w(O)/%	w(Na)/%	w(S)/%	w(C)/%
DP125-10-15	35.92	19.96	3.49	0.04	35.78	0.24		7.56
DP125-12-2	31.63	15.19	5.96		35.18		2.7	9.34
DP124-5-48	32.54	15.82	4.96	0.64	37.48	0.28		8.29

表5 重结晶磷灰石的扫描电镜能谱分析化学成分

Tab. 5 SEM and EDS Analysis Chemical Composition of Recrystallization Apatite

样品编号	w(Ca)/%	w(P)/%	w(F)/%	w(O)/%
DP125-10-22	36.82	18.34	5.14	39.7
DP125-10-23	37.45	18.92	4.86	38.8

表6 重结晶石英的扫描电镜能谱分析化学成分

Tab. 6 SEM and EDS Analysis Chemical Composition of Recrystallization Quartz

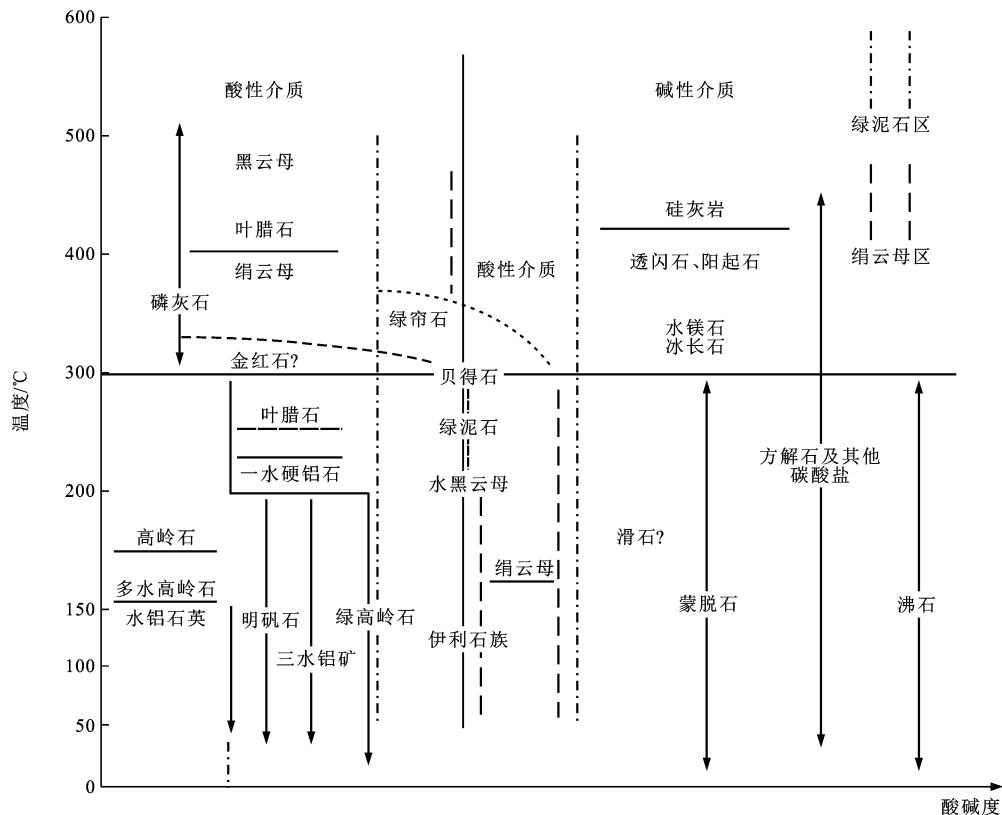
样品编号	w(Si)/%	w(O)/%
DP125-10-16	39.88	60.12
DP125-10-48	42.13	57.87

出的有机碳、矿质和热液作用携带的矿物质在磷块岩中的微裂隙聚集^[8]。在热液流体中,多种元素化合物都处在过饱和状态的动态环境下,出现斜方

钛铀矿、锐钛矿、含铅黄铁矿、叶腊石、绢云母、磷灰石、石英等中高温热液矿物共生组合快速晶出共沉淀现象^[9]。

成矿热液按温度高低分为高温(350 °C)、中温(150 °C~250 °C)和低温(150 °C)3类^[10]。斯特林格的热液合成试验为确定天然热液成矿作用的温度和酸碱度提供了重要依据。叶腊石、绢云母共沉淀晶出的准确确定温度为400 °C,磷灰石、叶腊石、绢云母共沉淀晶出的条件是酸性介质,成矿温度在340 °C~400 °C之间^[11](图10)。

钛铀矿在自然界中主要生成在中高温(300 °C~450 °C)还原环境^[2],因此,湘西北早寒武世海相沉积磷块岩中天然钛铀矿的形成与高温高压条件下海底火山热液喷出有成因联系。另外,Ti、V和Cr为铁族元素,只有在深源岩浆热液作用区、高温高压条



名称下划线的矿物表示它们的分布区是准确确定的

图10 温度和酸碱度对一些热液矿物形成的影响

Fig. 10 Effect of Temperature and pH on Some Hydrothermal Minerals

件下才能形成类质同象系列^[10]。不论从元素组合、矿物共生组合还是 Ti、V 和 Cr 类质同象系列形成条件,均反映湘西北海相磷块岩中的钛铀矿可能与镁铁质—超镁铁质海底喷流系统侵位于海相磷块岩发生的中高温热液成矿作用有关。

6 结语

(1)在扬子陆块东南缘湘西北武陵地区下寒武统牛蹄塘组海相黑色岩系下部鲕粒磷块岩中发现纳米级钛铀矿,通过扫描电镜化学成分、背散射电子图像和高分辨透射电镜能谱曲线确定其为 U 和 Ti 的复杂氧化物。

(2)钛铀矿产出于同沉积鲕粒磷块岩经强溶蚀重结晶作用形成的磷块岩微裂隙和重结晶磷灰石晶粒间微空隙中,与重结晶磷灰石、重结晶石英、锐钛矿、含铅黄铁矿、叶腊石、金云母、绢云母等共沉淀析出。

(3)钛铀矿中 U、Ti、V 和 Cr 元素分布呈现高度吻合状态,V 和 Cr 元素以均匀分散状态分布于斜方钛铀矿中,构成类质同象置换。

(4)湘西北海相磷块岩中斜方钛铀矿的形成与海底喷流沉积作用有成因联系。与镁铁质—超镁铁质海底喷流系统侵位于海相磷块岩并在高温高压条件下发生热液脱碳作用有关。

(5)超细小纳米级钛铀矿的发现对研究钛铀矿在自然界以结晶形态或结晶质变种形式存在提供了实体,对研究斜方钛铀矿在自然界的存在状态和成因机理有重要意义。

参考文献:

References:

- [1] 闵茂中,张富生.成因铀矿物学概论[M].北京:原子能出版社,1992.
MIN Mao-zhong,ZHANG Fu-sheng. An Introduction to the Formation of Uranium Mineralogy[M]. Beijing: Atomic Energy Press,1992.
- [2] 北京铀矿地质研究所 X 光实验室,武汉地质学院 X 光实验室.斜方钛铀矿:钛铀矿族的一种新矿物[J].地质学报,1978(3):241-251.
X-ray Laboratory,Beijing Institute of Uranium Geology, X-ray Laboratory,Wuhan Geological College. Ortho-brannerite: A New Mineral of the Brannerite Group [J]. Acta Geologica Sinica,1978(3):241-251.
- [3] BAYLISS P,ERD D C,MROSE M E,et al. Mineral Powder Diffraction File[R]. Newtown Square: Joint Committee on Powder Diffraction Standards,1986.
- [4] FRONDEL C. Systematic Mineralogy of Uranium and Thorium[R]. London: US Government Office,1958.
- [5] 漆富成,张字龙,何中波,等.扬子陆块东南缘黑色岩系铀多金属成矿体系和成矿机制[J].铀矿地质,2011,27(3):129-135.
QI Fu-cheng,ZHANG Zi-long,HE Zhong-bo, et al. Uranium-polymetallic Ore-forming System and Mechanism of the Black Rock Series in the Southeast Continental Margin of Yangtze Plate[J]. Uranium Geology, 2011,27(3):129-135.
- [6] 漆富成,张字龙,李治兴,等.中国碳硅泥岩型铀矿床时空演化规律[J].铀矿地质,2012,28(2):1-8.
QI Fu-cheng,ZHANG Zi-long,LI Zhi-xing, et al. Temporal and Spatial Evolution Pattern of Carbonaceous-siliceous-argillaceous Rock Type Uranium Deposits in China[J]. Uranium Geology, 2012, 28 (2): 1-8.
- [7] 漆富成,张字龙,李治兴,等.中国非常规铀资源[J].铀矿地质,2011,27(4):193-199.
QI Fu-cheng,ZHANG Zi-long,LI Zhi-xing, et al. Unconventional Uranium Resources in China[J]. Uranium Geology, 2011,27(4):193-199.
- [8] 漆富成,李治兴,张字龙,等.湘西北海相磷块岩的热液脱碳与铀多金属成矿作用[J].地学前缘,2015,22(4):188-199.
QI Fu-cheng,LI Zhi-xing,ZHANG Zi-long, et al. Hydrothermal Decarburation and Uranium-polymetallic Ore-mineralization in Marine Phosphorite, Northwestern Hunan[J]. Earth Science Frontiers, 2015,22(4): 188-199.
- [9] 漆富成,李治兴,王文全,等.湘西北海相磷块岩中气水溶液铀多金属成矿作用[J].矿床地质,2015,34(1):179-188.
QI Fu-cheng,LI Zhi-xing,WANG Wen-quan, et al. Uranium Polymetallic Ore-forming Process of Gas Solution in Marine Phosphorite of Northwestern Hunan[J]. Mineral Deposits,2015,34(1):179-188.
- [10] 张祖还.铀地球化学[M].北京:原子能出版社,1984.
ZHANG Zu-huan. Uranium Geochemistry[M]. Beijing: Atomic Energy Press,1984.
- [11] 陈光远,孙岱生,殷辉安,等.成因矿物学与找矿矿物学[M].重庆:重庆出版社,1988.
CHEN Guang-yuan,SUN Dai-sheng,YIN Hui-an, et al. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy[M]. Chongqing:Chongqing Publishing House,1988.