

基于 MCNP 的超临界水堆堆芯建模及中子通量计算

汤晓斌¹, 谢芹^{1,2}, 耿长冉¹, 陈达^{1,3}

1. 南京航空航天大学核科学与工程系, 南京 210016
2. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 621900
3. 西北核技术研究所, 西安 710024

摘要 超临界水堆是国际第 IV 代核能系统论坛推荐的 6 种第 IV 代核电反应堆型之一, 与现有的轻水堆相比, 具有热效率高、系统结构简单、造价低等优点。本文建立了 MCNP 程序下的超临界水堆堆芯物理计算模型, 解决了燃料组件几何结构过于复杂精细难以建模的技术难题, 考虑了堆芯轴向冷却剂密度的不均匀分布; 以超临界水堆堆芯模型为基础, 计算了堆芯径向中子通量密度分布, 提出了展平堆芯功率分布的设计方案; 计算了堆芯轴向中子通量密度分布, 讨论了控制棒不同作用方式对轴向中子通量密度峰的偏移影响, 确定了超临界水堆控制棒应采用由下向上插入的方式。研究结果为超临界水堆的设计制造、安全分析提供了重要参考依据, 为超临界水堆未来的设计和发展奠定了基础。

关键词 超临界水堆; MCNP; 中子通量

中图分类号 O571.54

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.005

Core Modeling and Neutron Flux Calculation for Supercritical Water Reactor Using MCNP

TANG Xiaobin¹, XIE Qin^{1,2}, GENG Changran¹, CHEN Da^{1,3}

1. Department of Nuclear Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
2. College of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 621900, China
3. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

Abstract The supercritical water reactor is one of the six reactors recommended by the Generation IV International Forum. Compared with existing light water reactors, it enjoys advantages of high thermal efficiency, simplified system structure and low cost. The physical model of the supercritical water reactor is established with the MCNP program in this paper, with consideration of the variations of the coolant density along the axial and the intricate geometry of the fuel assembly. Based on the core model of the supercritical water reactor, the radial neutron flux density distribution of the core is calculated and a design scheme of the flattening power distribution is proposed. The axial neutron flux density distribution of the core is calculated, and the effect of the control rod on the peak shift of the axial neutron flux density is discussed. It is suggested that the control rod of the supercritical water reactor should be inserted up from the bottom. This paper provides some food of thought for the construction and the security analysis of the supercritical water reactor, as well as for the application and the development of the supercritical water reactor.

Keywords supercritical water reactor; MCNP; neutron flux

0 引言

作为国际第 IV 代核能系统论坛推荐的 6 种第 IV 代核电

反应堆堆型之一^[1-2], 超临界水堆 (SCWR) 是运行在水的临界点 (374℃, 22MPa) 以上的高温高压水冷堆。超临界水堆使用

收稿日期: 2012-05-23; 修回日期: 2012-06-16

基金项目: 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目 (1006-56XZA11039)

作者简介: 汤晓斌, 副教授, 研究方向为核能与核技术工程, 电子信箱: tangxiaobin@nuaa.edu.cn; 陈达 (通信作者), 教授, 研究方向为核能与核技术工程, 电子信箱: dachen@nuaa.edu.cn

超临界水作为冷却剂,这种水既具有液体性质又具有气体性质,热传导效率远优于普通的轻水。用超临界水做冷却剂可使反应堆的热效率比目前的轻水堆提高约 1/3,且冷却剂不发生相变,堆芯能直接与能量转换设备连接,可以大大简化辅助系统 BOP(Balance of Plant)^[3-4]。

1 超临界水堆堆芯 MCNP 建模

本文在借鉴分析国外文献资料的基础上,设定了超临界水堆堆芯的设计方案^[5-7],并使用 MCNP 程序对超临界水堆堆芯进行建模。MCNP 程序由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室编制,现在已经成为世界上使用最为广泛的放射性粒子输运程序之一。由于堆芯几何结构复杂,本文在 MCNP 建模过程中共用了 6 级领域卡,并用 FILL 卡对堆芯 270 个增殖区和 163 个再生区燃料栅元进行逐一填充。

超临界水堆堆芯大致可分为 3 个区域:seed 区(快中子增殖区)、blanket 区(裂变材料再生区)和水区(水反射层区)。seed 区最小燃料单元中心为半径 0.448cm、高 376cm 的圆柱状 UO₂ 裂变材料,其中 ²³⁵U 富集度为 7%。UO₂ 裂变材料外包附厚度 0.008cm 的 He 气层。He 气层外是厚度 0.054cm 的锆包壳。锆包壳外是沿轴向密度变化的冷却剂(水)。整根燃料棒成六棱柱形,六棱柱燃料棒以 1.15cm 的栅距排列 8 层组成 seed 区六棱柱形燃料组件。燃料组件外有厚度为 0.1cm 的锆合金包壳。seed 区燃料组件如图 1、图 2 所示。blanket 区以天然铀为核燃料,与 seed 区在几何结构上相似。blanket 区最小燃料单元几何中心为半径 0.4cm 的冷却剂(水),冷却剂外是厚度为 0.026cm 的锆管,锆管外为天然铀。最小六棱柱单元以 1.15cm 栅距排列 8 层构成六棱柱形 blanket 燃料组件,组件外有 0.1cm 厚锆合金包壳。blanket 区域燃料组件如图 3、图 4 所示。水区水栅格中为轻水冷却剂,其密度变化沿轴向变化。图 5 和图 6 分别为整个堆芯 blanket 区燃料组件、seed 区燃料组件与水区分布的径向截面和轴向截面。

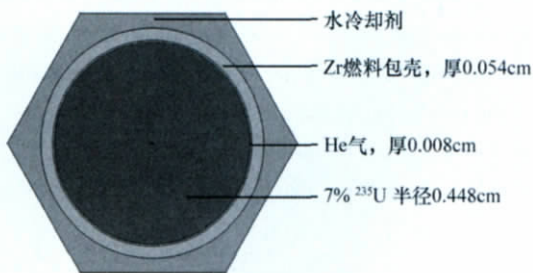


图 1 Seed region fuel rod unit cell

在超临界水堆堆芯中,冷却剂水在超临界状态(25MPa, 385℃)下,沿堆芯轴向流动的过程中,不断吸收来自堆芯核燃料裂变释放出的热量,冷却剂温度逐渐升高,冷却剂密度也随之变化。据文献[6]可知,冷却剂密度沿轴向从进口处的

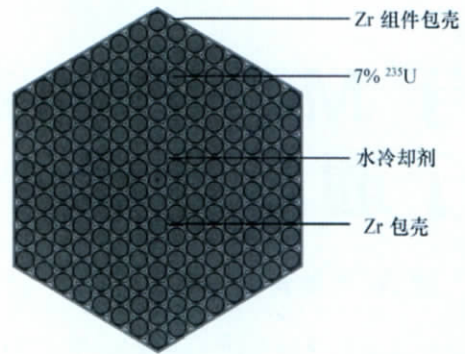


图 2 Seed region fuel assembly

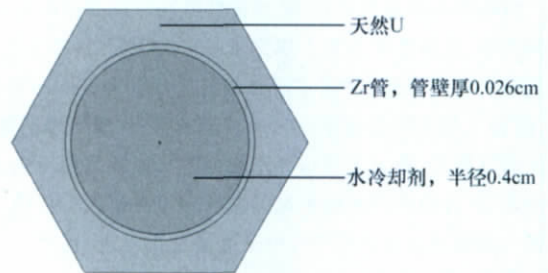


图 3 Blanket region fuel rod unit cell

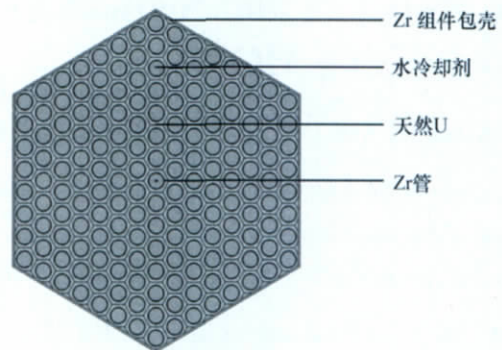


图 4 Blanket region fuel assembly

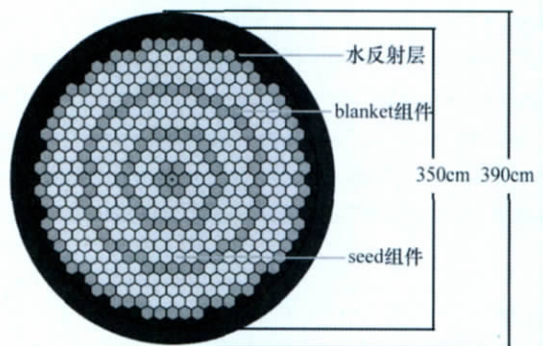


图 5 SCWR core radial section

0.825g/cm³ 连续变化到出口处的 0.125g/cm³。考虑到 MCNP 中

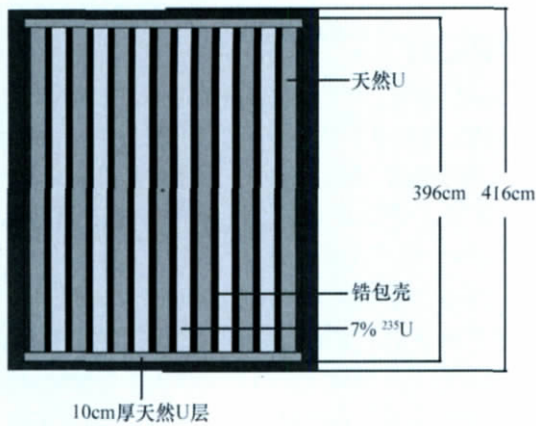


图 6 超临界水堆堆芯轴向截面
Fig. 6 SCWR core axial section

无法实现冷却剂密度的连续变化, 本文将堆芯沿轴向按冷却剂密度 $0.05\text{g}/\text{cm}^3$ 间隔分层分为 15 层, 具体分层方式如表 1 所示。

表 1 冷却剂密度沿堆芯轴向分布
Table 1 Coolant density axial distribution

冷却剂密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	堆芯轴段/cm
0.125	376—293.5
0.175	293.5—230.4
0.225	230.4—200
0.275	200—180.4
0.325	180.4—165.2
0.375	165.2—152.8
0.425	152.4—141.3
0.475	141.3—132.6
0.525	132.6—121.7
0.575	121.7—113
0.625	113—102.2
0.675	102.2—87
0.725	87—67.4
0.775	67.4—47
0.825	47—0

2 超临界水堆堆芯中子通量密度的计算

中子通量密度表示单位体积内所有中子在单位时间内穿行距离的总和, 通俗地讲, 即单位时间内穿过单位面积的中子数。它是一个标量并不是矢量, 它是反应堆的重要参数, 其大小反映堆芯内核反应率的大小, 因此也反映出堆芯的功率水平。

本文通过 MCNP 计算堆芯各栅元内中子通量, 从而绘制堆芯径向中子通量密度三维图; 通过对堆芯轴向进行分层, 计算每层内的中子通量, 从而得到堆芯轴向中子通量分布。在 MCNP 中, F4 卡可以计算一个栅元上的平均中子通

量, 单位: cm^{-2} 。

2.1 径向中子通量密度计算与分析

超临界水堆径向中子通量密度计算结果如图 7、图 8 所示。图 7 为三维曲面图, z 轴为中子通量数值, x, y 分别代表堆芯两个相互垂直的水平方向。图中颜色代表中子通量大小等级, 不同的颜色代表不同的中子通量数值, 颜色由浅变深所代表的中子通量数值依次增加。图 8 为穿过堆芯几何中心的中子通量密度二维轴截面图 (零点位于堆芯中心), 该图根据二维截面上每个燃料栅元中子通量绘制而成, 每个直方柱代表一个元素栅元。其中“B”表示该栅元属于 blanket 区, “S”表示该栅元属于 seed 区。

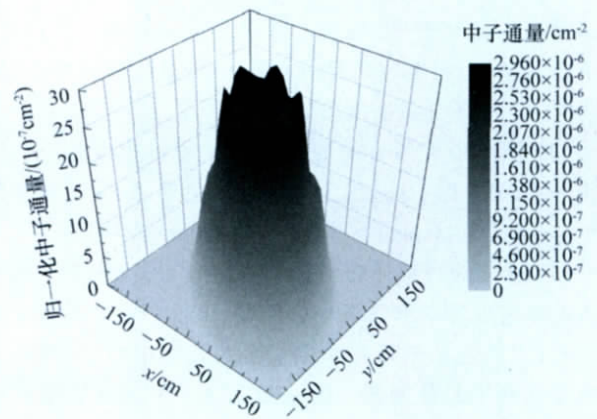


图 7 SCWR 径向中子通量三维分布
Fig. 7 SCWR radial neutron flux three-dimensional distribution

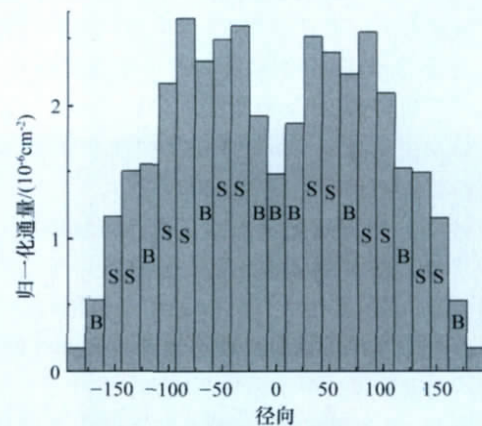


图 8 SCWR 径向中子通量二维分布
Fig. 8 SCWR radial neutron flux two-dimensional distribution

由图 7、图 8 可以看出, 堆芯 blanket 区栅元内中子通量平均低于相邻的 seed 区栅元内中子通量。这是因为在 blanket 区中子主要被 ^{238}U 吸收产生 ^{239}Pu , 新一代中子较少, 而 seed 区中子主要被 ^{235}U 吸收, 发生裂变反应。 ^{235}U 每吸收一个中子平均放出 2—3 个新中子, seed 区新一代中子数较多, 所以

seed 区中子数平均大于相邻 blanket 区中子数。分析图 7、图 8, 可以得到以下结论。

(1) 超临界水堆堆芯归一化中子通量密度最大值不超过 2.960×10^{-6} 粒子数/cm²。

(2) 堆芯径向中子通量分布图上存在 6 个尖角, 这是由堆芯 seed 组件和 blanket 组件排列造成的, 尖角区域 seed 燃料组件较多, 中子增殖剧烈。在进一步的设计中, 可以通过改变 seed、blanket 燃料组件排列或者在尖角处燃料组件中添加毒物棒, 以消除通量尖角, 展平堆芯中子通量。

(3) 超临界水堆堆芯几何中心处中子通量密度较低。这是由堆芯 seed 区和 blanket 区栅元的排列形式决定的。blanket 区燃料为天然铀, 其中 ²³⁵U 浓度远小于 seed 区。中子进入 blanket 区大部分被 ²³⁸U 吸收, 越靠近 blanket 栅元几何中心, 中子通量越低, 而堆芯几何中心处于 blanket 栅元中心, 故堆芯几何中心中子通量密度较低。

(4) 堆芯最外围 seed 栅元上中子通量密度并不明显高于相邻 blanket 区, 这是因为越靠近堆芯外围, 中子通量密度越小, seed 区与 blanket 区中子分布差异变得不明显。

(5) 堆芯的功率分布与中子通量分布类似, 中子通量最大值处亦为堆芯功率峰所在的位置, 由堆芯中中子通量分布可以看出, 堆芯功率峰并非位于堆芯几何中心上, 而是分布在堆芯几何中心外围的一圈 seed 区上。相对于普通的压水堆, 堆芯内功率变化平缓, 反应堆的安全性更高。

2.2 轴向中子通量密度计算与分析

使用 MCNP 计算堆芯轴向中子通量密度的分布, 首先必须将堆芯沿轴向分成若干段, 然后分别对每小段进行计数。在 MCNP 中并未采用定义实际曲面对堆芯进行分层的方法测量中子通量密度, 而是采用 FS 卡中虚拟曲面进行堆芯轴向的分段, 然后联合 F4 和 SD4 卡进行中子通量计数。这样既简化了堆芯的几何结构, 又提高了程序运行效率。seed 区和 blanket 区轴向中子通量密度计算结果如图 9 所示(“轴向”左边为堆芯底部)。

seed 区轴向中子通量密度最大值为 1.03948×10^{-5} 粒子数/cm², 位于堆芯中下部 -140cm 处。seed 区中子主要集中于堆芯下部 (<0cm 段), 堆芯上部 (>0cm) 中子数相对较少。这是因为, 堆芯冷却剂在沿轴向从堆芯顶部到底部逐渐变大, 堆芯下部冷却剂密度大, 中子慢化程度大, 热中子份额多, ²³⁵U 裂变反应剧烈, 中子增殖多, 故而堆芯下部中子通量密度较大。堆芯上部冷却剂密度小, 中子慢化程度小, 中子与 ²³⁵U 裂变反应几率小, 中子增殖少, 故而堆芯上部中子通量密度低。

blanket 区轴向中子通量密度最大值为 4.53006×10^{-6} 粒子数/cm², 位于堆芯下部 -140cm 处。blanket 区中子主要分布在堆芯下部, 堆芯上部中子数少。这是因为, blanket 区 ²³⁵U 浓度远小于 seed 区, 其中子主要来源于 seed 区扩散, 而 seed 区中子通量分布受冷却剂密度影响, 呈现堆芯下部多上部少的情况, 所以 blanket 区轴向中子通量分布亦是下部多、上部少。

另外, 对比图 9 中 blanket 区与 seed 区的中子通量密度分布, 可以看出以下几点。

(1) seed 区轴向中子通量密度普遍高于 blanket 区轴向中子通量密度, 这验证了径向中子通量密度分布中 seed 区中子通量密度高于相邻 blanket 区中子通量的结果。究其原因, seed 区是增殖区, ²³⁵U 浓度高, 裂变产生的中子数多, 而 blanket 区是再生区, ²³⁵U 浓度低, 几乎无中子增殖, 中子来源于 seed 区, 且中子进入 blanket 区后部分被 ²³⁸U 吸收。

(2) 堆芯轴向中子通量密度峰位于堆芯下部 -140cm 处。与普通压水堆中子通量峰位于堆芯轴向中心处相比, 超临界水堆中子通量峰位置下移 50%。这是因为, 普通压水堆中冷却剂密度均匀, 而超临界水堆中从堆顶部到堆底部冷却剂密度逐渐变大。冷却剂密度的此种变化影响了中子慢化, 冷却剂密度越大, 对中子的慢化能力越强, 更多的快中子被慢化成热中子, ²³⁵U 裂变反应数增多, 中子增殖剧烈, 所以超临界水堆中越靠近堆底, 中子密度越大, 但是中子泄露率也在靠近堆底过程中增加。中子泄露和冷却剂密度变化的双重影响导致超临界水堆轴向中子通量密度峰位于堆芯中下部。

(3) seed 区和 blanket 区轴向中子通量分布形状大致相同。中子主要集中于堆芯下部, 堆芯上部中子数少。这是因为 blanket 区中子来源于 seed 区中子扩散, 故两个区域中子分布形状类似。而堆芯冷却剂密度下部大于上部, 导致中子慢化程度堆芯下部大于上部, ²³⁵U 裂变反应数堆芯下部大于上部, 从而中子增殖数堆芯下部多于上部, 所以堆芯下部中子数多, 上部中子数少。

(4) 堆芯功率分布与中子通量分布类似, 由堆芯轴向中子通量分布图可以看出, 堆芯轴向功率峰位于堆芯底部 -140cm 处。堆芯上部功率较小, 下部功率较大, 且堆芯由顶部到底部, 功率先增加后减小。

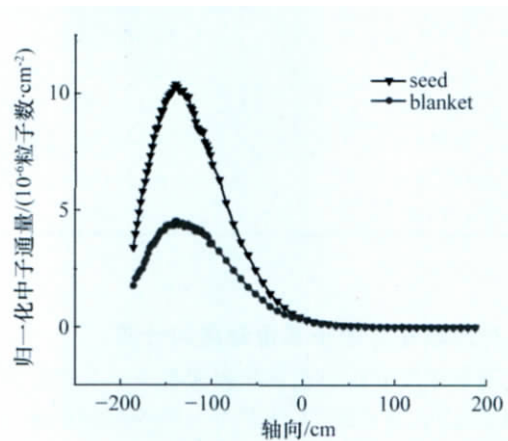


图 9 seed 区与 blanket 区轴向中子通量分布
Fig. 9 Seed region and blanket region axial neutron flux distribution

3 结论

超临界水堆是继承了现行水冷技术和超临界火电技术

的革新设计,它以良好的经济性和安全性成为第一代堆6种堆型中极具发展潜力的堆型。本文通过MCNP程序设计了以 UO_2 为增殖区装料、天然铀为再生区装料、轻水为堆芯冷却剂下单循环超临界水冷快堆的几何结构,计算并分析了堆芯的中子通量分布情况。

(1) 建立了MCNP程序下的超临界水堆堆芯物理计算模型,解决了燃料组件几何结构过于复杂精细难以建模的技术难题。

(2) 以超临界水堆堆芯模型为基础,计算了堆芯内270个增殖区燃料组件及163个再生区燃料组件内的中子通量密度,并绘制成堆芯径向中子通量密度分布图,提出了在中子通量密度峰值处插入控制棒,以展平堆芯功率分布的方案。单循环超临界水堆内,再生区内中子通量密度小于相邻的增殖区内中子通量密度,且堆芯内径向中子通量密度峰值位于堆芯几何中心外围增殖区上,而非堆芯几何中心处,堆芯功率密度相对普通压水堆得到了展平。

(3) 计算了堆芯增殖区和再生区轴向中子通量密度分布。与普通压水堆中子通量密度峰位于堆芯中心相比,单循环超临界水堆轴向中子通量密度峰位置下移50%左右。

参考文献 (References)

[1] 程旭, 刘晓晶. 超临界水堆国内外研发现状与趋势[J]. 原子能科学技术

术, 2008, 42(2): 168-170.

Cheng Xu, Liu Xiaojing. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, 42(2): 168-170.

[2] 郑明光, 叶成, 韩旭. 新能源中的核电发展[J]. 核技术, 2010, 33(2): 81-86.

Zheng Mingguang, Ye Cheng, Han Xu. *Nuclear Techniques*, 2010, 33(2): 81-86.

[3] 曹良志, 吴宏春. 高功率密度超临界水冷快堆堆芯概念设计 [C]. 第十二届反应堆数值计算与粒子运输学术会议, 合肥, 10.25-31, 2008.

Cao Liangzhi, Wu Hongchun. Conceptual design of high power density core modeling for supercritical water reactor [C]. 12th Reactor Numerical Calculation and Particle Transport Conference, Hefei, China, October 25-31, 2008.

[4] 杨孟嘉, 任俊生, 周志伟. 第4代核能系统研发介绍 [J]. 国际电力, 2004, 8(5): 30-35.

Yang Mengjia, Ren Junsheng, Zhou Zhiwei. *International Electric Power for China*, 2004, 8(5): 30-35.

[5] Yoo J, Ishiwatari Y, Oka Y, et al. Conceptual design of compact supercritical water-cooled fast reactor with thermal hydraulic coupling[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2006, 33(11-12): 945-956.

[6] Mori M. Core design analysis of the supercritical water fast reactor[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2005.

[7] Yamaji A, Kamei K. Improved core design of the high temperature supercritical-pressure light water reactor [J]. *Annals Nuclear Energy*, 2005, 32(7): 651-670.

(责任编辑 马宇红, 代丽)

·学术动态·

“第十一届全国矿床会议”征文



“第十一届全国矿床会议”将于2012年10月19—26日在贵阳市召开。本次大会由中国地质学会矿床地质专业委员会、中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会、中国矿业联合会主办。

征稿范围 (1) 区域矿产与成矿规律 (2) 铁矿床成矿过程及勘查技术方法 (3) 铀矿成矿过程与找矿评价 (4) 内生金属矿床成矿作用 (5) 现代与古代海底成矿作用 (6) 卡林型金矿和密西西比河谷型铅锌矿 (7) 大陆表生成矿过程与富集规律 (8) 成矿过程的模拟与实验 (9) 成矿作用的地球化学示踪及成矿年代学 (10) 地质流体与成矿 (11) 正岩浆型矿床 (12) 金矿床成矿过程与背景 (13) 深部矿产勘查技术理论与方法 (14) 矿产资源预测评价理论与方法 (15) 矿产资源战略、矿业经济与可持续发展 (16) 矿产资源综合利用及矿山环境 (17) 现代分析测试技术及应用 (18) 三江特提斯带沉积岩容矿 Pb-Zn-Cu-Ag 成矿作用 (19) 发展矿业重大政策研讨;

论文截稿日期: 2012年8月1日

联系电话: 010-68335862 68999027

电子信箱: kchy2012@126.com

会议网站: www.cags.ac.cn/gonggao/2012/0401.html