

# 小型核电站堆芯方案

解家春, 刘天才

中国原子能科学研究院反应堆工程研究设计所, 北京 102413

**摘要** 具有长寿命、非能动安全的小型核电站是核电发展的一个重要方向。本研究设计了一个小型核电站堆芯方案。该方案为池式钠冷快堆, 采用移动反射层和堆内固定吸收体实现较长的堆芯寿期。进一步计算表明, 该堆芯方案的寿期可达 30 年, 功率分布合理, 各种反应性系数为负值, 控制方式的价值足够, 满足设计要求。

**关键词** 小型核电站; 长寿命; 堆芯设计

**中图分类号** TL371

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.009

## Reactor Core Scheme for Small Nuclear Power Plant

XIE Jiachun, LIU Tiancai

Department of Reactor Engineering Research & Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

**Abstract** The small nuclear power plant enjoys advantages of long life and passive safety and is an important choice in the future nuclear power development. A conceptual core is designed for the small nuclear power plant. It is a pool-type fast reactor with sodium as coolant, the movable reflector and the fixed absorber as the reactivity control system for long-life. Further calculation results show that the life of the reactor could be as long as 30 years, with a reasonable power distribution, all the reactivity coefficients negative, enough reactivity control worth, and all parameters satisfy the design requirements.

**Keywords** small nuclear power plant; long-life; reactor core design

### 0 引言

按照国际原子能机构的定义, 300MW 以下的核电机组称之为小型核电机组。近年来, 先进的革新型小型核电机组在安全性、经济性、选址灵活性和用途广泛性等方面都独具特色, 符合第四代核能系统发展要求, 受到了国际核能界的高度关注。国际原子能机构就中小型反应堆先后召开了多次研讨会, 对 20 多个中小型堆的设计进行了评论<sup>[1]</sup>。

小型核电站作为大中型核电机组的有益补充, 是解决偏远地区、海岛等远离主电网地区长期电力供应的有效措施, 将为这些地区的经济发展、军事驻防等提供有力保障。

目前已有的创新性小型核电站的设计方案涉及到各种类型的反应堆, 包括水冷反应堆、气冷反应堆和液态金属冷却反应堆。水冷反应堆主要有美国西屋公司的国际改进型安全反应堆 IRIS<sup>[2]</sup>、美国通用电气与普度大学合作开发的模块化简化沸水堆 MSBWR<sup>[3]</sup>等。气冷反应堆主要有南非的球床模块化反应堆 PBMR<sup>[4]</sup>、美国设计的 GT-MHR<sup>[5]</sup>等。液态金属冷

却反应堆主要有美国阿贡国家实验室开发的 STAR<sup>[6]</sup>和日本东芝公司开发的 4S 反应堆<sup>[7]</sup>等。

本文分析了小型核电站应具备的特点, 参考国际上小型堆的设计, 给出了一个小型长寿命核电站的堆芯方案, 并通过相关的计算证明了该方案的合理性和可行性。

### 1 堆芯方案

#### 1.1 堆芯方案权衡

小型核电站的功率较小, 相对于大型核电站来说, 单位电功率的初期投资较大, 因此需要降低运行阶段的成本, 以获得较高的经济性。从各种小型堆的设计来看, 降低运行成本的方式主要集中在采用较长的换料周期甚至不换料, 以及减少运行维护人员, 因此长寿命、自动运行和固有安全性是其必备的特征。

实现堆芯长寿命的限制主要有两个方面: 一是燃料的燃耗深度和各种材料的耐辐照性能, 二是堆芯要有足够的剩余

收稿日期: 2012-05-24; 修回日期: 2012-06-16

作者简介: 解家春, 工程师, 研究方向为反应堆工程, 电子信箱: xiejiaochun@139.com

反应性。在固定燃耗深度和材料耐辐照参数的情况下,如要达到长寿命的要求,就必须降低比功率,从而降低堆芯的功率输出水平。而从经济性角度来看,比功率不能太小,否则单位电功率的造价太高,因此为了达到长寿命的要求,应该尽量提高燃耗深度和选择耐辐照的材料。从反应性平衡的角度看,为实现长寿命,需要提高初始剩余反应性来补偿燃耗效应,但过大的剩余反应性将使控制方式复杂化,不利于自动运行的实现,因此小型核电站的堆芯(以下简称小型堆)需要具备一定的转换比以补偿部分燃耗反应性,从而降低初始剩余反应性。

快中子堆有利于可裂变核素的转换,因此小型堆更适合采用快堆设计。对于小型堆来说,不需设置堆芯外围的增殖区,核素的转换完全发生在堆芯内部,因此堆芯泄漏率较小才能保证一定的转换比。

在快堆设计中,一个重要的参数是冷却剂空泡反应性系数。对于小型核电站而言,固有安全性是其必备的特征,因此必须将空泡系数设计为负值。对于快堆而言,要想获得负的空泡系数,就要增加堆芯的泄漏率。这样,堆芯尺寸不能设计得太大,同时要设法增加堆芯的泄漏。就堆芯形状而言,能够增加泄漏的堆芯形状有细长形堆芯和扁平形堆芯。再考虑堆芯冷却剂、气腔和结构的影响,细长形的堆芯更有利于中子泄漏,实现空泡系数为负值。

核素转换和空泡系数对中子泄漏率的要求是互相矛盾的,并且小型堆结构紧凑,不利于控制装置在堆芯内的布置。为解决这些矛盾,借鉴已有的小型堆设计理念<sup>[8]</sup>,采用了轴向移动径向反射层作为控制方式的设计。对于一般的反应堆,反射层都是固定安放在堆芯外围。而小型堆的径向反射层可沿堆芯外围轴向移动,以改变中子泄漏情况。在寿期初,反射层的位置较低,随着堆芯寿期进行,反射层逐渐向上移动。在有反射层包围的堆芯部分,中子泄漏较少,转换比较高,而在无反射层的堆芯部分,中子泄漏较大,从而保证整个堆芯为负的空泡反应性系数。随着反射层的向上移动,被包围的堆芯部分越来越多,中子泄漏减少,反应性增加,从而部分补偿了燃耗造成的反应性损失。

## 1.2 堆芯描述

小型核电站采用钠冷快堆方案,为一体化设计,设计寿命 30 年,寿期内不需要换料。反应堆一回路为池式设计,冷却剂为液态钠,从堆芯流过的高温液态金属钠,经过中间换热器冷却,将热量传递给二回路,被冷却的液态金属钠经过电磁泵驱动后,再次流入堆芯。小型堆设计热功率 30MW,电功率 10MW。堆芯入口处的冷却剂温度为 355℃,出口温度 510℃。小型堆的冷却剂进出口温度较一般的钠冷快堆要稍低一些,这主要是为了留有足够的热容量。冷却剂流量为 547t/h,经过堆芯后的压降约为 0.1MPa。

小型堆堆本体由中心停堆棒、固定吸收体、18 盒燃料组件、堆芯围筒、6 块反射层、反射层围板、冷却剂下行腔室、径向屏蔽块和反应堆容器等部分组成,堆芯布置见图 1。小型堆

采用六角形燃料组件,全堆共 18 盒燃料组件,堆芯活性区高度 2.5m,等效直径 0.95m。按照燃料中  $^{235}\text{U}$  富集度的不同,燃料组件分为两种,位于内区的是富集度 17% 的组件,而外区的富集度为 19%。内外区采用不同富集度主要是为了展平堆芯的径向功率分布。

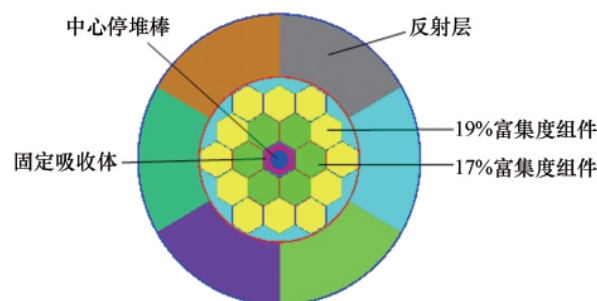


图 1 堆芯布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reactor core

六角形组件的对边距为 20.4cm,每盒组件内有 169 根燃料元件。在组件内,燃料元件呈三角形排列,栅格比 1.08。燃料元件直径 14mm,包壳厚度 1.1mm,燃料芯块直径 10.4mm,燃料芯块高度 2.5mm。在芯块上方为气腔,以容纳燃耗过程中释放的裂变气体。气腔段与燃料段的长度之比为 1.3。燃料组件的套管厚度为 0.2cm,相邻组件的套管间距为 0.2cm。

小型堆的燃料采用金属燃料 U-10%Zr。金属燃料铀含量高,中子能谱硬,密度高,堆芯的燃料布置可以更紧密,以减少堆芯体积和易裂变燃料的装量,并且导热性能非常好,虽然熔点较低,但其高导热率可以补偿这一缺陷。金属燃料循环有利于简化燃料制造与再加工、核废物处理的工艺,显著降低燃料循环的成本。金属燃料的缺点是燃耗略低,但超过 16000 根 U-10%Zr 燃料曾在美国的 EBR-II 反应堆中进行了考验,结果表明能够满足小型堆对燃耗等方面的性能要求<sup>[9]</sup>。燃料包壳和燃料组件套管采用 HT9 钢。

在堆芯中心是中心停堆棒和固定吸收体,它们占据了一个与燃料组件外形相同的栅格。该栅格的套管尺寸和材料与燃料组件完全相同。靠近套管内壁的是固定吸收体。固定吸收体的外形为六边形,中心有一圆形孔,用于安置中心停堆棒。固定吸收体与套管之间有 0.5cm 的间隙,可供冷却剂流过,以冷却固定吸收体。固定吸收体材料为铍。铍在钠中具有很好的抗腐蚀性能,并且使用寿命很长,符合小型堆的长寿命需求。固定吸收体的作用相当于可燃毒物。在堆芯寿期的前半段,固定吸收体位于堆芯内,抑制剩余反应性,配合反射层的轴向向上移动,实现较长的运行时间。与可燃毒物随燃耗逐渐消耗不同,固定吸收体由铍制成,其价值基本不随燃耗变化。在寿期的后半段,固定吸收体从堆芯内抽出,释放抑制的反应性。同时,反射层回落到与寿期初差不多的位置,然后再轴向向上移动,到寿期末,基本移到最顶端。在堆芯内加入固定吸收体解决了单靠反射层难以控制较大的剩余反应

性、实现较长堆芯寿期的问题,同时在反射层的再次向上移动过程中,也能更充分地使转换来的 $^{239}\text{Pu}$ 裂变。固定吸收体

与反射层联合补偿燃耗反应性的过程如图2所示。

固定吸收体中心孔是中心停堆棒孔道,直径14cm。中心

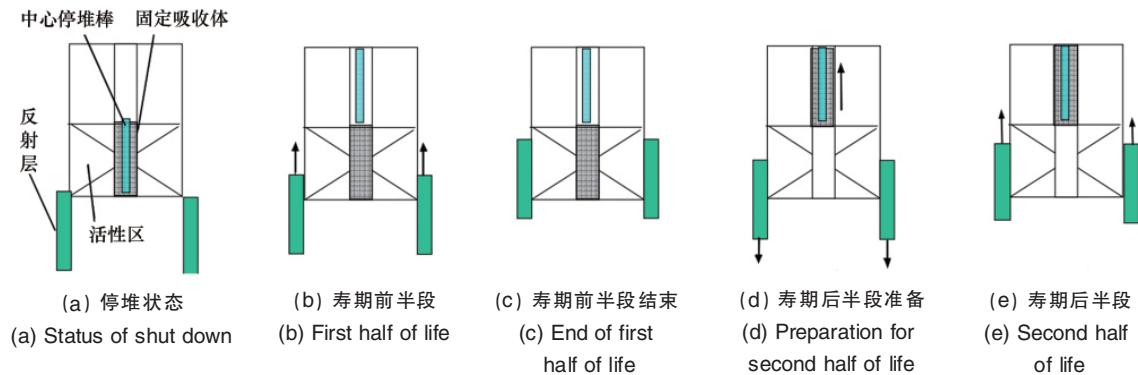


图2 补偿燃耗反应性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of burnup compensation

停堆棒直径12cm,由碳化硼制成,其中 $^{10}\text{B}$ 的富集度为80%。中心停堆棒的包壳厚度为0.2cm,同样由HT9钢制成。中心停堆棒在反应堆正常运行期间,位于堆芯上部,其作用是提供大的负反应性以作为紧急停堆之用。除紧急停堆之外,在反应堆未启动状态下,中心停堆棒也插入堆芯,保持堆芯处于次临界状态。

燃料组件的外侧是堆芯围筒,用以隔离燃料组件与反射层,同时也起分流冷却剂的作用。正常运行时,98%流量的冷却剂从堆芯流过,剩余的2%流过反射层,以带走沉积在反射层中的热量。围筒内径104cm,厚度1cm,选择的材料同样为HT9钢。

堆芯围筒外侧是环形的反射层。反射层等分为6块环形扇面,每块都可单独轴向移动。反射层厚38cm,高2.7m,材料为改良型9Cr1Mo。反射层内有很多小孔,可供冷却剂流过,用于带走沉积的热量。在每块反射层上方安置了厚38cm、高2.5m的空腔,以排挤本应占据该位置的冷却剂钠,从而使中子更容易泄漏出堆芯,增强了反射层轴向移动的作用效果。该空腔的外壳同样由改良型9Cr1Mo制成,内部充氩气。在轴向上,2.5m高的空腔等分为3段,以防止外壳出现破口导致冷却剂钠完全充满该块空腔。

反射层外是围板。围板是冷却剂上行流和下行流的分隔界面。在围板外侧是径向屏蔽块等其他结构,经过中间换热器被降温的冷却剂沿此下行到堆芯底部。围板内侧是反射层和堆芯,冷却剂向上流过堆芯和反射层,被加热到高温,然后流经中间换热器,加热二回路工质。围板和堆芯围筒还为反射层提供了轴向移动的通道,有径向定位反射层的作用。围板的厚度为1cm,材料同样为HT9钢。

反射层围板外侧为径向屏蔽块及冷却剂的下行腔。径向屏蔽的外侧是反应堆容器。反应堆容器是承压部件,包容整个堆芯和一回路。反应堆容器的壁厚2.5cm,直径3.5m,材料选用304不锈钢。在反应堆容器外还有一层容器,称为防护

容器,该层容器与堆顶半球形的顶盖一起构成安全壳系统。防护容器与反应堆容器之间有一气腔,充满氩气。设置防护容器的目的是防止反应堆容器泄漏而导致一回路钠的流失。

## 2 堆芯方案计算

### 2.1 计算方法

小型核电站的堆芯寿期较长,燃耗计算是物理计算的主要内容之一,因此必须选择能够准确计算燃耗的程序。本文采用MVP-BURN程序。

MVP-BURN程序是日本原子能研究所开发的基于蒙特卡罗方法的计算程序<sup>[10]</sup>。它由进行临界计算的MVP程序和进行燃耗计算的BURN程序组成。在该程序系统中,MVP程序被BURN程序调用,进行临界计算;而BURN程序进行燃耗链计算和文件处理(生成MVP的输入文件和用于接续计算的相关文件以及读取MVP的输出文件)。

由于小型堆的堆芯为细长形状,并且在反射层逐渐向上移动过程中,堆芯的轴向功率分布会发生较大的变化,为准确计算堆芯特性,必须考虑这种变化。因此,在建立计算模型时,将整个活性区沿轴向划分为25段,以考虑燃耗造成的各部分核子密度的差异。在径向上,按照与中心的距离,将燃料组件分为3类,取各类组件的平均值作为该类所有组件的输入,以减少计算误差。这样共将燃料区划分为75个燃耗区。固定吸收体的材料为铪,虽然铪的各同位素均有较大的中子吸收截面,但为考虑其在燃耗过程中的变化情况,也将它划作一个燃耗区单独考虑。由于小型堆的堆芯寿期长达30年,在计算燃耗时,可将燃耗步长取得大一些,以节省计算时间。在实际计算中,取6个月为一个燃耗步长。

### 2.2 临界参数

在正常运行时,小型堆的中心停堆棒拔出堆芯,仅靠反射层的移动来控制反应性。经计算,在寿期初,固定吸收体位于堆内,当反射层高度为150cm时,有效增殖系数 $k_{\text{eff}}=1.00048$ ;

当反射层全部移动到堆芯顶部时,  $k_{eff}=1.03521$ 。在寿期末, 固定吸收体已经提出堆芯外, 反射层移动到堆芯顶部,  $k_{eff}=1.00513$ 。

### 2.3 快中子注量

快中子是指能量大于 0.1MeV 的中子。快中子照射是引起材料辐照损伤的主要因素, 工程上常用快中子注量来衡量, 它是快中子注量率对时间的积分。表 1 给出了堆芯主要区域的快中子注量率和快中子注量。从表中可以看出, 小型堆的快中子注量率较低, 这是因为整个堆芯的燃料装量比较大。在 30 年寿期内, 主要部件的快中子注量都在可接受的范围内。

表 1 主要区域的快中子注量  
Table 1 Integrated fast neutron flux in main regions

| 区域    | 快中子注量率/( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 快中子注量/( $\text{cm}^{-2}$ ) |
|-------|---|----------------------------|
| 组件内部  | $1.78\times 10^{13}$                          | $1.69\times 10^{22}$       |
| 组件套管  | $1.71\times 10^{13}$                          | $1.62\times 10^{22}$       |
| 堆芯围筒  | $1.43\times 10^{13}$                          | $1.35\times 10^{22}$       |
| 反射层   | $8.79\times 10^{12}$                          | $8.32\times 10^{21}$       |
| 反射层围板 | $2.78\times 10^{12}$                          | $2.63\times 10^{21}$       |

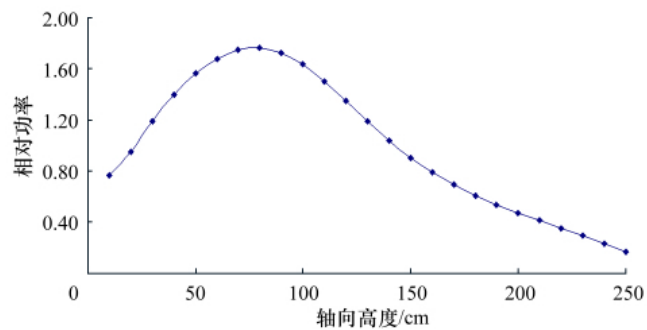


图 4 寿期初轴向功率分布  
Fig. 4 Axial power distribution at beginning of life

堆芯的最大线功率密度为 75.03W/cm, 寿期末的最大线功率密度为 61.38W/cm, 平均线功率密度为 39.45W/cm。

### 2.5 控制系统价值

小型堆有两种控制反应性的手段, 分别是轴向移动的反射层和位于堆芯中心的停堆棒。在正常运行时, 中心停堆棒位于堆芯上方, 而反射层沿轴向移动, 以补偿各种反应性效应。由于小型堆具有一定的转换能力, 转换比约为 0.47, 在燃料耗期间内, 反射层的移动速度较慢, 每 6 个月移动约 3cm。寿期初, 反射层的总价值为 81.2mk。当反射层处于临界位置时, 如果一块反射层失控提高堆芯顶部, 则引入的反应性最大为 2.5mk, 小于缓发中子份额, 不会导致瞬发临界事故。寿期初, 中心停堆棒的价值为 33.1mk。当反射层落到底部, 并且插入中心停堆棒时, 引入的反应性为 -85.6mk。从计算结果看, 小型

### 2.4 功率分布

功率分布是热工计算的主要输入条件之一。图 3 给出了寿期初各组件的功率不均匀因子。从图 3 可以看出, 组件的功率不均匀性较好, 这是因为堆芯的径向尺寸较小, 并且采用了内低外高的富集度布置方案。图 4 和图 5 给出了轴向功率分布。从图 4 和图 5 可以看出, 寿期初堆芯下部的功率密度较大, 而寿期末则堆芯上部的功率密度较大, 这是因为反射层在寿期初的位置较低, 而在寿期末则完全包围了堆芯活性区。在寿期初,

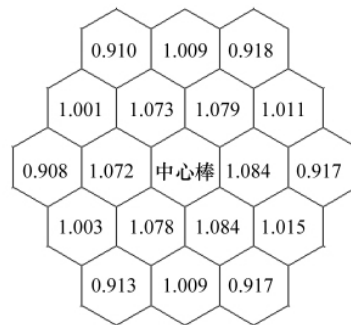


图 3 寿期初组件功率不均匀因子  
Fig. 3 Power distribution of different assemblies at beginning of life

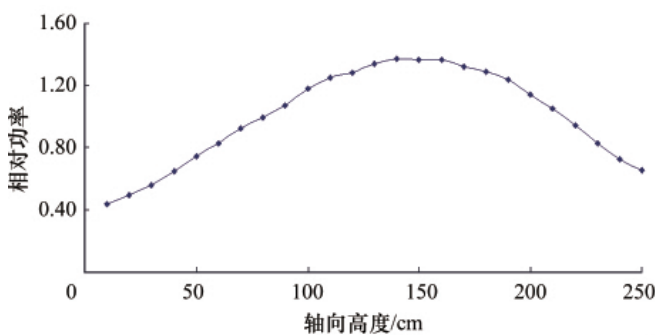


图 5 寿期末轴向功率分布  
Fig. 5 Axial power distribution at end of life

堆的两套停堆系统的价值足够, 能够满足安全停堆的要求。

### 2.6 反应性系数

小型堆的固有安全性要求温度反应性系数、空泡反应性系数均为负值。经计算, 小型堆的燃料温度反应性系数为  $-3.99776\times 10^{-5}/\text{k}$ , 寿期初的空泡反应性系数为  $-4.57005\times 10^{-4}/1\%$  空泡, 寿期末的空泡反应性系数为  $-2.96369\times 10^{-4}/1\%$  空泡。寿期末的空泡系数小于寿期初, 这主要是因为寿期末反射层已经移到最上方, 中子泄漏要小得多。从计算结果看, 小型堆的主要反应性系数均为负值, 满足设计要求。

### 3 结论

小型核电站在安全性、经济性、选址灵活性和用途广泛性等方面独具特色, 可作为大中型核电机组的有益补充, 是核

电发展的一个不可忽视的重要方向。本工作根据小型核电站应具有的使用寿命、自动运行和固有安全性等特点,设计了一个堆芯方案。该方案为池式钠冷快堆,采用移动径向反射层、堆内固定吸收体等的方式控制反应性,实现堆芯的长寿命。采用 MVP-BURN 程序对该堆芯方案进行了物理计算,并给出了主要物理参数。计算结果表明,该堆芯方案的寿期可达 30 年,各种反应性系数为负值,两种控制方式的价值足够,可作为进一步深入研究的基础。

#### 参考文献 (References)

- [1] IAEA. Status of small reactor designs without on-site refuelling [R]. IAEA-TECDOC-1536, Vienna, IAEA, 2007.
- [2] Carelli D. The design and safety features of the IRIS reactor[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2004, 230(1): 151-167.
- [3] 刘志铭, 丁亮波. 世界小型核电反应堆现状及发展概况 [J]. 国际电力, 2005, 9(6): 27-31.  
Liu Zhiming, Ding Liangbo. *International Electric Power of China*, 2005, 9(6): 27-31.
- [4] Nicholls D. The pebble bed modular reactor [J]. *Nuclear News*, 2001(4):

35-40.

- [5] LaBar M P. The gas turbine-modular helium reactor: A promising option for near term deployment [C]. Proceedings of ICAPP'02, La Grange Park, IL: American Nuclear Society, 2002.
- [6] Siemicki J J, Petkov P V. Passive safety of the STAR-LM HLHC natural convection reactor [C]. ICONE 10-22290, Arlington, USA, April 14-18, 2002.
- [7] Hattori S, Handa N. Use of super-safe, small and simple LMRs to create green belts in desertification area [J]. *Transactions of the American Nuclear Society*, 1989, 60: 437-439.
- [8] Nobuyuki U, Izumi K, Akio M, et al. Sodium cooled small fast long-life reactor "4S"[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2005, 47(1): 222-230.
- [9] Wal T. Thirty years of fuel and materials information from EBR-II[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1999, 270: 39-48.
- [10] Yasunobu N, Keisuke O, Takamasa M, et al. MVP/GMVP II: General purpose Monte Carlo codes for neutron and photon transport calculations based on continuous energy and multigroup methods[R]. JAERI 1348, Tokai, Ibaraki: Japan Atomic Energy Research Institute, 2005.

(责任编辑 马宇红,代丽)

· 学术动态 ·

## “第 32 届全国毛纺年会”征文

由全国毛纺织产品调研中心,全国毛纺织科技信息中心,中国纺织工程学会毛纺专业委员会,毛纺科技杂志社主办的“第 32 届全国毛纺年会”定于 2012 年 10 月在北京昌平区。

征文内容:(1)当前经济形势对我国毛纺织、毛针织工业的影响;(2)对《纺织工业“十二五”发展规划》的解读;(3)我国毛纺织、毛针织工业的技术发展和展望;(4)纺织面料如何适应服装行业的要求;(5)各种新型纤维在毛纺织、毛针织上的应用、产品开发与质量控制的经验措施;(6)新技术、新工艺、新设备器材的应用对提高各工序制品、半制品质量的作用和经验;(7)毛纺企业实验室建设及实验室检测技术等相关内容;(8)各种毛精(粗)纺织物、毛针织物的工艺设计及产品开发;(9)提高纱线、织物质量的因素分析与综合对策;(10)精梳机的工艺、技术措施和新产品开发的经验;(11)半精梳工艺、设备和新产品的开发;(12)自调匀整装置的应用,以及对提高质量效果的分析;(13)毛羽的成因分析和各工序减少毛羽的经验措施;(14)细纱牵伸形式、工艺和成纱质量的关系;(15)新型纺纱技术的研究开发成果和技术经济效益分析;(16)提高无梭织机效率及质量的措施研究;(17)浆纱工艺的发展应用对提高成品质量的效果分析;(18)无梭织机开发新品种的经验与措施;(19)国内外毛纺织品、毛针织产品后整理的现状与发展趋势;(20)毛纺织品、毛针织产品后整理的新工艺、新技术、新设备;(21)毛纺织、毛针织新助剂的研发、生产及应用;(22)毛纺织品、毛针织产品后整理的环保化、功能化;(23)毛纺织品、毛针织后整理新工艺对助剂的新要求;(24)染色技术的研究和应用。

论文截稿日期:2012 年 7 月 30 日

联系电话:010-65078673

通信地址:北京市朝阳区延静里中街 3 号主楼 603 室中国纺织工程学会毛纺专业委员会/毛纺科技杂志社(100025)

电子信箱:mfnh333@sina.com

会议网站:www.ctes.com.cn/xshd/hytz/35111.htm