

Kalina 地热发电循环分析

朱家玲, 卢志勇, 张伟, 付文成

天津大学机械工程学院地热研究培训中心, 天津 300072

摘要 Kalina 地热发电循环的首次运用是在 2000 年 7 月的冰岛胡萨维克。运行两年后通过测试, Kalina 循环被认为是利用中低温热能最具应用前景的方式之一。本文通过工程方程求解器 EES 编制计算软件, 完成了系统循环过程的模拟计算, 计算结果与实际运行参数吻合较好。在此基础上, 对影响 Kalina 地热发电热力循环效率的汽轮机入口压力和氨的质量浓度进行了分析。同时, 也对汽轮机的安全运行范围进行了计算。最后, 分析了系统的火用损失。

关键词 地热发电; Kalina 循环; 效率; 氨-水混合工质

中图分类号 TK529

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.32.006

Kalina Cycle of Geothermal Power Production

ZHU Jialing, LU Zhiyong, ZHANG Wei, FU Wencheng

Tianjin Geothermal Research and Training Center, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract In July 2000, Kalina cycle is first time used in Husavik, Iceland and is considered to be one of the most promising ways for utilizing the low-temperature heat sources. By using the software of EES, a calculating program is compiled to simulate the cycle process and the results have fitted with the actual operating parameters quite well. On this basis, the influence factors, such as turbine inlet pressure and mass fraction of ammonia which associated with the cycle efficiency are analyzed. In addition, the safe operating range of turbine is calculated and the exergy loss is sized up.

Keywords geothermal power generation; Kalina cycle; efficiency; ammonia-water mixtures

0 引言

地热能是一种新型的清洁能源, 其高效性、经济性和环境效益越来越受到各个国家的重视。中国由于受到地质条件的限制, 地热流体温度普遍处于 150℃ 以下。尝试利用这部分中低温地热能用于发电, 既有助于解决发电紧张的问题, 又能减少二氧化碳排放造成的环境污染。

目前针对较高温度的地热资源, 通常的利用方式是将地热水蒸汽或汽水混合物直接或闪蒸进入发电系统做功转换为电能。而对于产生蒸汽参数低, 做功能力不足的中低温地热资源, 通常采用有机朗肯循环(ORC)发电系统^[1-2]。与 ORC 相比, Kalina^[3-4]地热发电循环是一种新型循环, 且有许多优势^[5-7]。从原则上讲, Kalina 地热发电循环是在 ORC 基础上的一种改进。这种改进体现在对 ORC 循环过程的改变, 即将“纯”的循环介质(通常为水)变成了氨水混合物。Kalina 地热发电循环最大特点是能够实现变温蒸发, 即随着蒸发过程的进行, 氨

水混合物的浓度随着氨气的蒸发而不断降低, 导致混合物的沸点增加。在与热源的热量交换过程中, 混合物的沸点与热源温度能够较好地匹配, 从而减少了熵的增加。Lolos 等^[8]提出用低温热源来驱动 Kalina 地热发电循环的方式, 分析了氨水质量浓度的变化对汽轮机入口的压力和系统效率的影响。

本文对 Kalina 地热发电循环^[9-10]进行模拟计算。分析了氨水的质量浓度、冷凝水温度、汽轮机入口压力等因素对系统循环效率的影响以及工质泵的耗功与汽轮机入口压力等之间的关系。可以为不同地质和不同工况条件下 Kalina 地热发电循环系统设计提供理论基础。

1 Kalina 地热发电循环系统原理

典型的 Kalina 地热发电循环原理如图 1 所示。该循环系统总共有 3 个循环回路。第 1 个回路是地热水从地热生产井抽出(状态点 1)经过发生器换热后回灌(状态点 14)。第 2 个

收稿日期: 2012-09-11; 修回日期: 2012-10-19

作者简介: 朱家玲, 教授, 研究方向为低焓地热资源利用工艺及系统研究, 电子邮箱: zhujl@tju.edu.cn

回路是氨水溶液在系统中的循环:基本溶液在发生器中被加热后(状态点 2),由于氨气沸点较低,因此部分氨气挥发出来,形成的气液两相氨水混合物进入分离器。分离器上部的氨蒸汽(状态点 3)进入汽轮机做功,分离器下部的富水溶液(状态点 5)进入高温回热器进行换热后再节流降压(状态点 6),这时的富水溶液再与从汽轮机出来的乏汽(状态点 4)在 7 处混合(状态点 8)成为基本溶液。混合过程是对乏汽的部分吸收过程,8 点处的基本溶液为气液两相。基本溶液通过低温回热器后(状态点 9)再进入冷凝器完全冷凝为液态(状态点 10)。基本溶液经过加压泵升压(状态点 11),然后依次流经低温回热器(状态点 12)和高温回热器(状态点 13)回收部分热量,随后基本溶液再次进入发生器进行下一次循环。第 3 个回路是流经冷却塔的冷凝水的回路。

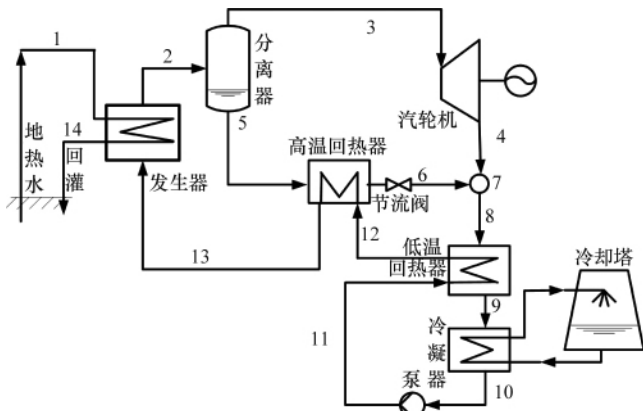


图 1 Kalina 地热发电循环系统原理图

Fig. 1 Principle scheme of Kalina cycle system

2 Kalina 地热发电循环系统模型的建立

2.1 基本控制方程

本文对该循环系统进行模拟计算时,采用氨水热物性方程及能量、质量、组分守恒等控制方程来描述系统各个部件的运行特性。以下列出了计算该模型的主要方程:

总质量守恒方程:

$$\Delta_{out}^{in} \left(\sum_i m_i \right) = 0 \quad (1)$$

其中, m 表示各点的质量流量, kg/s。

能量守恒方程:

$$\Delta_{out}^{in} \left(\sum_i h_i m_i \right) + \Delta_{out}^{in} \left(\sum_j w_j \right) + \Delta_{out}^{in} \left(\sum_k Q_k \right) = 0 \quad (2)$$

其中, h 表示各点的焓值, kJ/kg; w 表示各部件所做的功, kW; Q 表示各部件所吸收的热量, i, j, k 为不确定数值, 视系统而定。

氨水气液平衡方程:

$$(1-x)\phi_1(V', T, x) = (1-y)\phi_1(V'', T, y) \quad (3)$$

$$x\phi_2(\bar{V}', T, x) = y\phi_2(\bar{V}'', T, y) \quad (4)$$

其中, V' 为液态物质的量体积, L/mol; V'' 为气态物质的量体积, L/mol; \bar{V}' 表示饱和液态物质的量体积, L/mol; \bar{V}'' 表示饱和和气态物质的量体积, L/mol; x 表示氨的液态物质的量分数; y 表示氨的气态物质的量分数; ϕ_1 表示水的逸度系数; ϕ_2 表示氨的逸度系数。

汽轮机等熵效率为

$$\eta_{urb} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (5)$$

其中, h_3 表示汽轮机入口焓值, kJ/kg; h_4 表示汽轮机实际出口焓值, kJ/kg; h_{4s} 表示汽轮机等熵条件下出口焓值, kJ/kg。

Kalina 地热发电循环效率:

$$\eta_k = \frac{m_s \times (h_3 - h_4) \cdot \eta_g - W_{pump}}{Q_{geo}} \quad (6)$$

其中, η_g 表示发电机的效率, W_{pump} 表示工质泵消耗的功, kW; Q_{geo} 表示地热水放出的热功, kW。

为了便于分析系统中各部件的性能, 对各部件的火用值进行了计算。

对于状态点的火用值为

$$E_i = m \cdot [(h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o)] \quad (7)$$

其中, 下标 i 表示状态点; 下标 o 表示对应环境的值; T 表示温度, K; s 表示熵值, J/K。

稳态时状态点的火用损失为

$$I = \sum_i E_{in} - \sum_i E_{out} \quad (8)$$

发生器的火用损失为:

$$I_{gen} = \sum_i E_{in, gen} - \sum_i E_{out, gen} \quad (9)$$

分离器的火用损失为:

$$I_{sep} = E_{in, 2} - E_{out, 5} - E_{out, 3} \quad (10)$$

汽轮机的火用损失为

$$I_{urb} = E_{in, 3} - E_{out, 4} - W_{urb} \quad (11)$$

其中, W_{urb} 表示汽轮机所做的功, kW。

高温回热器火用损失为

$$I_{HT} = E_{in, 5} + E_{in, 12} - E_{out, 13} - E_{out, 6} \quad (12)$$

低温回热器火用损失为

$$I_{LT} = E_{in, 8} + E_{in, 11} - E_{out, 9} - E_{out, 12} \quad (13)$$

冷凝器火用损失为

$$I_{cond} = E_{in, 9} - E_{out, 10} \quad (14)$$

工质泵火用损失为

$$I_{pump} = W_{pump} + E_{in, 10} - E_{out, 11} \quad (15)$$

2.2 基本条件的确定

Kalina 地热发电循环是一个比较复杂的系统, 为了能够简化计算, 加快求解, 本文对该模型做出如下假设: (1) 不计各设备连接管道的阻力; (2) 不考虑换热器和过冷器漏热与跑冷; (3) 机组在稳定工况下运行; (4) 整个系统处于热平衡和稳定状态; (5) 不存在冷凝不足和发生不足的情况; (6) 忽略流阻、热损失, 工质节流前后焓相等; (7) 冷凝器中氨水混

合物的出口温度可由冷凝温度确定^[11]。

通过对 Kalina 地热发电循环系统分析可知,当给定系统的初始独立变量后,系统的状态即可确定。为了使模拟结果更具有可比性,且能够较好的验证模拟结果,本文参考文献

表 1 计算模型的基本参数

Table 1 Basic parameters of the computing model

项目	数值
地热供水温度/°C	122
回灌温度/°C	80
地热水流量/(kg·s ⁻¹)	89
冷凝水入口温度/°C	5
基本溶液浓度/%	82
汽轮机入口压力/MPa	3.23
汽轮机等熵效率/%	87
发电机效率/%	96
工质泵效率/%	98
经过换热器压力损失/MPa	0.1
蒸发器最小传热温差/°C	6
回热器最小传热温差/°C	5
冷凝器最小传热温差/°C	3

[12]中的工况进行模拟计算,确定的一些必要参数见表 1。

3 模型求解思路

Kalina 地热发电循环系统的数学模型是一个大型的非线性方程组。EES 在求解该热力循环过程时,将包含非线性描述的方程和相互影响的状态参数流变成一系列易于求解的

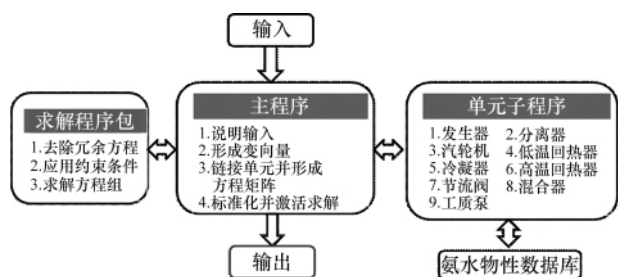


图 2 模型求解的流程图

Fig. 2 Flowchart for model solution

线性方程。模型求解的实现过程如图 2 所示。

4 模拟结果分析

4.1 汽轮机入口压力对 Kalina 地热发电循环效率的影响

汽轮机入口压力对进入汽轮机中氨气的焓值和质量流量都会产生较大的影响,进而影响汽轮机做功能力及系统整体循环效率。图 3 为汽轮机入口压力与循环效率的关系。

从图 3 可以看出,在氨的质量浓度一定的情况下,系统的循环效率随着压力的增加先缓慢升高后急剧下降。这是因为随着压力的增加,汽轮机进出口的焓差缓慢增大,氨气的

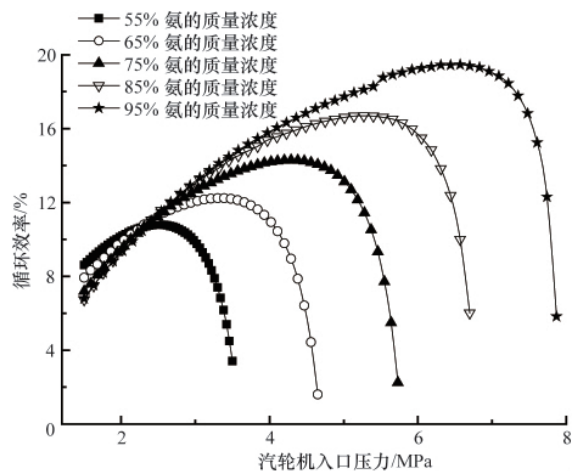


图 3 Kalina 地热发电循环效率与汽轮机入口压力的关系
Fig. 3 Cycle efficiency vs turbine inlet pressure for Kalina cycle

循环流量也增大,使汽轮机输出功率增多。随着压力的继续增加,汽轮机进出口焓差反而开始缓慢减少,并且基本溶液的流量急剧增加,导致工质泵耗功急剧增加(如图 4 所示),使

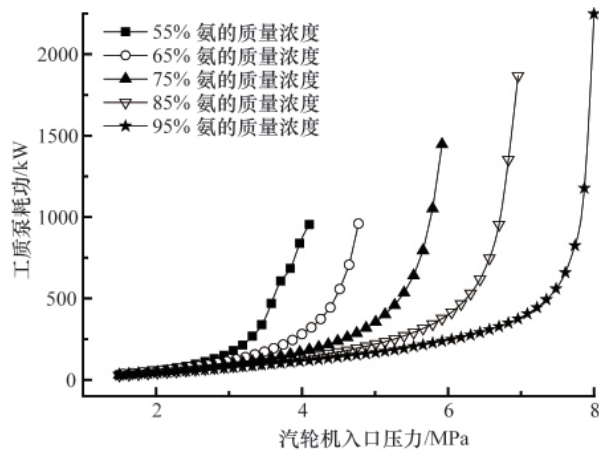


图 4 工质泵耗功与汽轮机入口压力的关系
Fig. 4 Power consumption of working fluid pump vs turbine inlet pressure

得系统循环效率下降。

4.2 氨的质量浓度对循环效率的影响

氨的质量浓度不同将导致基本溶液的沸点和露点不同, Kalina 地热发电循环正是利用了氨水溶液的这一优点。溶液在循环过程中变温蒸发和冷凝,图 5 表明了不同质量浓度的氨水溶液与热源的热交换过程。

氨的质量浓度主要通过影响进入汽轮机中氨气的循环流量来影响发电效率。通过计算发现,循环效率随着氨的质量浓度的增加而增加,如图 6 所示。这是因为氨的质量浓度越高,沸点越低,从而导致发生器中蒸发出来氨气的量增加,使汽轮机输出功率增加。

然而,并不是氨的质量浓度越高越好。当氨的质量浓度

接近于 100% 时, 其热物性越接近于纯质特性, 将失去变温蒸发的特性, 在发生器中与热源的热交换过程就会接近于图 5 中的纯氨曲线。这就意味着发生器的换热面积需要增大, 加大

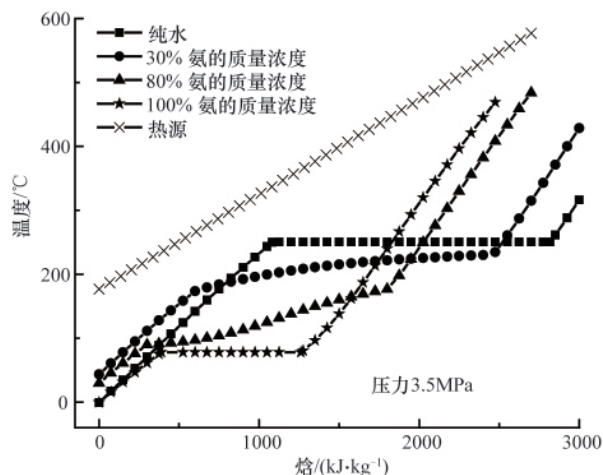


图 5 不同质量浓度的氨水溶液与热源的热交换过程
Fig. 5 Heat transfer process between NH₃ with different mass fractions and heat source

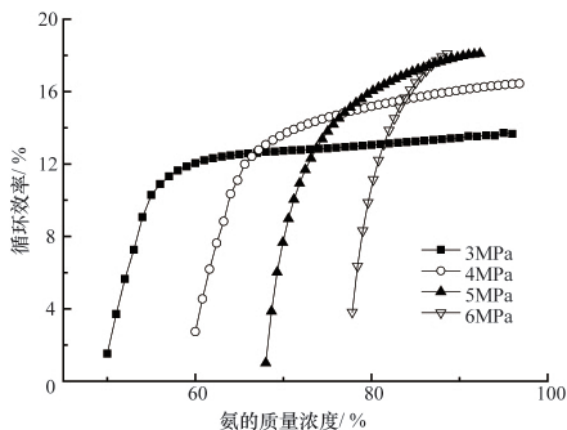


图 6 循环效率与氨的质量浓度的关系
Fig. 6 Cycle efficiency vs. mass fraction of NH₃

系统的投资会降低系统的经济性。

4.3 汽轮机入口压力与氨的质量浓度对汽轮机出口干度的影响

在 Kalina 地热发电循环系统设计的过程中, 应当注意汽轮机的安全使用。为了避免汽轮机遭到损坏, 汽轮机出口处液体质量分数应保证小于 10%^[12], 即干度大于 0.9。图 7 绘制了汽轮机出口处干度为 0.9 的曲线。图中左上方为干度大于 0.9 的区域, 因此, 在系统设计时, 应该保证压力和浓度处于图中左上方的区域内。

4.4 Kalina 地热发电循环的火用分析

以表 1 中参数作为运行工况, 经计算后得出 Kalina 地热发电循环的输入火用, 输出火用和火用损失, 如表 2 所示。绘

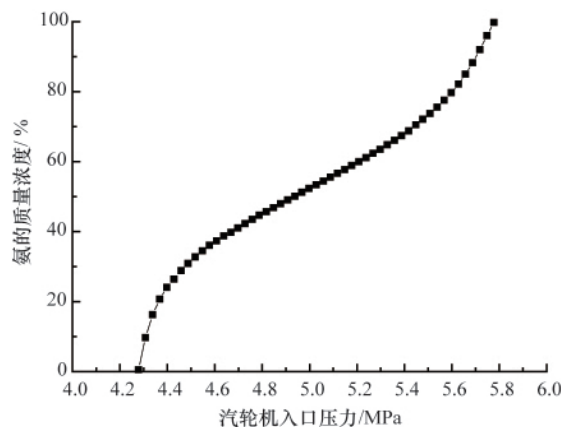


图 7 汽轮机出口的干度与压力和氨质量浓度的关系
Fig. 7 Vapor mass fraction and pressure turbine outlet vs. the mass fraction of NH₃

制出的对应火用流图如图 8 所示。从图 8 中可以看出火用损失最大的地方是在发生器和冷凝器中, 其次是在汽轮机和低温回热器中。因此, 对这几个主要部件的优化是提高系统发电效率的主要目标。

表 2 Kalina 地热发电循环各部件火用损失

Table 2 Exergy loss for the each unit of Kalina cycle

火用	部件	量/kW	百分比/%
输入火用	发生器	4350	100
输出火用	净发电量	2182	50
火用损失	发生器	687.1	16
	分离器	0	0
	汽轮机	300.9	7
	高温回热器	134.8	3
	低温回热器	332.9	8
	节流阀	14.9	0
	混合室 7	2.37	0
	冷凝器	688.6	16
工质泵	6.75	0	

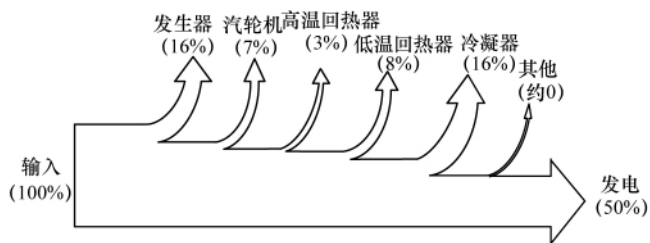


图 8 火用流图

Fig. 8 Exergy flowchart

5 结论

氨水混合物作为 Kalina 地热发电循环工质具有许多优点。其中, 最主要的是氨水混合物的沸腾和凝结都是在“变

温”条件下完成的。本文以氨水混合物的物性为基础,编写了 Kalina 地热发电循环的模拟程序,模拟结果与文献[10]基本一致,计算结果得到了有效验证。通过分析模拟结果得出以下结论。

(1) Kalina 地热发电循环系统的效率随着汽轮机入口压力的增加先缓慢增加后急剧下降。急剧下降主要是受基本溶液流量的影响。因此,对于某一浓度的基本溶液都有一个对应的最佳压力。

(2) Kalina 地热发电循环系统的效率随着氨的质量浓度的升高而升高,浓度越高增加的越慢。但氨的质量浓度过高将使混合溶液逐渐失去变温蒸发这一特性,这就要求发生器的换热面积过大,造成系统整体经济性下降。

(3) 为了使汽轮机能够安全运行,汽轮机入口压力和氨的质量浓度必须处在合适的范围内。在设计和匹配系统时,所有这些因素都应该考虑在内。

(4) 在整个 Kalina 地热发电循环系统中,火用损失的大小依次是发生器、冷凝器、低温回热器和汽轮机。减少发生器的火用损失可以通过优化发生器的机构从而提高发生能力。

参考文献 (References)

- [1] 储静娴. 低温地热发电 ORC 工质与系统经济性优化研究[D]. 天津:天津大学,2009.
 Chu Jingxian. Working fluids and economic optimization of low-temperature geothermal ORC systems [D].Tianjin: Tianjin University,

- 2009.
- [2] Hettiarachchi H D, Golubovic M, Worek W, *et al.* Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources[J]. *Energy*, 2007, 32(9): 1698-1706.
- [3] Kalina A I. Combined cycle system with novel bottoming cycle [J]. *Eng Gas Turbines Power*, 1984, 106(4): 737-742.
- [4] Kalina A I, Leibowitz H M. Application of the Kalina cycle technology to geothermal power generation [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 1989, 13: 605-611.
- [5] El-Sayed Y M, Tribus M. A theoretical comparison of the Rankine and Kalina cycles[J]. *ASME Special Publications*, 1985, AES-1: 97-102.
- [6] Ibrahim O M, Klein S A. Absorption power cycles [J]. *Energy (Oxford)*, 1996, 21(1): 21-27.
- [7] Ibrahim O M, Klein S A. High-power multi-stage rankine cycles [J]. *Journal of Energy Resour, Technol*, 1995, 117(3): 192-196.
- [8] Lolos P A, Rogdakis E D. A Kalina power cycle driven by renewable energy sources[J]. *Energy*, 2009, 34(4): 457-464.
- [9] Hjartarson H, Maack R, Johannesson S. Húsavík energy, multiple use of geothermal energy[C]. Reykjavik, Iceland, 2003.
- [10] Hjartarson H. Multiple-use of geothermal energy in Húsavík, Nordvarme [C]. Council in Nykping, Sverige, 2002.
- [11] 袁卫星, 王海, 花严红, 等. 氨水吸收式热泵一种通用模拟方法研究 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(4): 454-458.
 Yuan Weixing, Wang Hai, Hua Yanhong, *et al.* *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2008, 29 (4): 454-458.
- [12] Ogriseck S. Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(14-15): 2843-2848.

(责任编辑 岳臣)

· 学术动态 ·



第十四届全国生物材料大会

“第十四届全国生物材料大会”将于 2013 年 9 月 22—25 日在西安市召开,该会由中国生物医学工程学会生物材料分会主办。

征稿范围:(1)生物医用高分子材料;(2)生物医用无机非金属材料;(3)生物医用金属材料;(4)生物医用复合材料;(5)组织工程与干细胞;(6)纳米生物材料及纳米技术;(7)生物矿化与仿生制备;(8)生物材料的表面修饰及其生物应答特性;(9)药物多功能载体与控释;(10)生物医学材料的组织再生及临床应用研究;(11)生物材料表征和生物相容性评价;(12)骨科生物力学和力学生物学;(13)生物材料及医疗器械的先进加工成型技术研究;(14)其它。

摘要截稿日期:2013 年 4 月 30 日。

论文截稿日期:2013 年 6 月 30 日。

电子邮箱:ninbrc@163.com。

大会网站:<http://www.c-nin.com/download/%E7%94%9F%E7%89%A9%E6%89%80.htm>。